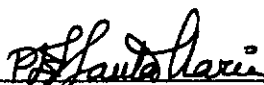


UMA ANÁLISE DE RECALQUES PELO MÉTODO DE ASAOKA MODIFICADO  
COM ENFOQUE PROBABILÍSTICO

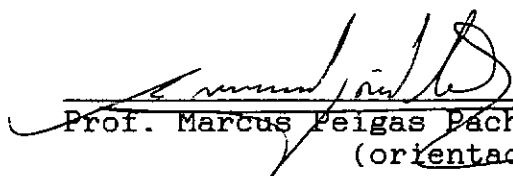
**Celina Aída Bittencourt Schmidt**

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGR-  
MAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
CIVIL.

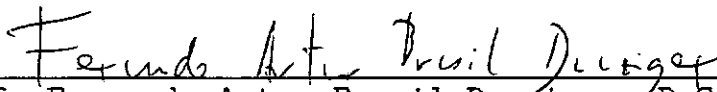
Aprovada por:



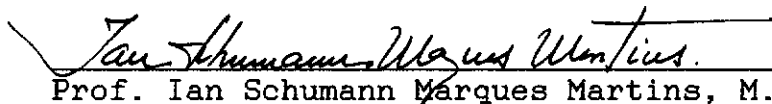
Prof. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, Ph.D  
(presidente - orientador)



Prof. Marcus Peigas Pacheco, Ph.D  
(orientador)



Prof. Fernando Artur Brasil Danziger, D.Sc.



Prof. Ian Schumann Marques Martins, M.Sc.

SCHMIDT, CELINA AIDA BITTENCOURT

Uma Análise de Recalques pelo Método de Asaoka Modificado com Enfoque Probabilístico [Rio de Janeiro] 1992

XIX, 271 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1992)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Mecânica dos Solos

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

\ À minha avó Celina

Aos meus pais,

Salvador e Lêda.

Aceito o desafio de subir uma montanha desconhecida. Dispo-  
nho de bússola, mapas e equipamentos. A bússola me orienta,  
os mapas me dão as informações de que preciso e os equipa-  
mentos facilitam a minha jornada. A vitória porém, depende  
principalmente da minha vontade de vencer e de decisões que  
só eu poderei tomar.

Começar a caminhada... Mas isso não é nada fácil! Fico pa-  
rada no sopé da montanha por algum tempo. São momentos di-  
fíceis e dolorosos até que eu me decida entre várias opções  
aquela que me parece ser a mais acertada para iniciar a ca-  
minhada.

Vou seguindo, pegando atalhos, acertando e errando. Às ve-  
zes paro para recuperar as energias. Outras vezes tenho que  
voltar atrás ao ver que o caminho não é o correto.

No meio da caminhada me sinto mais disposta e confiante.  
Tudo parece que vai dar certo. Mesmo continuando a ter di-  
ficuldades já não mais duvido de que chegarei lá em cima.

Mas o tempo passa e os mantimentos têm um prazo para se  
acabar. E a todas as angústias e dúvidas que já tenho jun-  
ta-se a sensação de que o tempo trama contra mim.

Depois de dias incontáveis começo a duvidar de que seja  
possível o êxito. Estou cansada e com medo. O que fazer?  
Voltar é impossível. Desistir me fará morrer. Sinto então  
que preciso reunir o resto das forças que me restam e ter-  
minar o que comecei.

Valeu a pena! Chego finalmente ao cume e a sensação de vitória é maior e mais importante do que todas as dificuldades pelas quais passei. Afinal, dei o melhor de mim, não desisti, abri mão de parte da minha vida para chegar até o final e consegui vencer o desafio, a despeito de todas as minhas limitações.

Celina Schmidt.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, pela confiança e pela orientação correta e competente.

Ao professor Marcus Peigas Pacheco, pelo estímulo e pela valiosa orientação.

Ao professor Márcio de Souza Soares de Almeida, pela sugestão do tema.

A Sônia Bittencourt Schmidt Waldheim e Lúcia Schmidt de Andrade Lima, minhas irmãs e amigas, pelo carinho, apoio e colaboração na realização deste trabalho.

A Alvaro de Souza da Silva, Carlos Alberto Moreira Ferreira e Ovídio Velasco de Oliveira, pela amizade e colaboração.

A Branca Regina Cantisano dos Santos e Silva Riscado Terra, pela troca de idéias e fornecimento de material para esta pesquisa.

A Sérgio Ricardo Alves Ribeiro, pelo capricho e competência na confecção dos desenhos.

Ao professor Ian Schumann Marques Martins, pelas sugestões.

As minhas sobrinhas, Janina e Flávia, pelas alegrias.

Aos professores da COPPE, pela amizade e ensinamentos recebidos.

Aos colegas da COPPE, pelo carinho e amizade.

Aos amigos, pelo apoio e compreensão nas horas difíceis.

A PLANAVE S.A. Estudos e Projetos de Engenharia, pelo apoio.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

## UMA ANÁLISE DE RECALQUES PELO MÉTODO DE ASAOKA MODIFICADO COM ENFOQUE PROBABILÍSTICO

Celina Aida Bittencourt Schmidt

FEVEREIRO, 1992

Orientadores: Prof. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria

Prof. Marcus Peigas Pacheco

Programa: Engenharia Civil

Nesta dissertação é feita uma análise dos recalques medidos em placas sob o Aterro Experimental II do Sarapuí, pelo Método de Asaoka Modificado, com vistas à obtenção de coeficientes de adensamento e recalques totais por adensamento da camada de argila mole ali existente.

O referido aterro localiza-se às margens do Rio Sarapuí, sobre uma camada de argila mole (argila mole do Sarapuí), sendo composto por sete seções instrumentadas, cinco das quais com elementos verticais drenantes e duas sem elementos verticais drenantes.



Por se dispor de resultados de diversas placas, é aplicado a esta análise um tratamento probabilístico simples, possibilitando a obtenção de intervalos de confiança para os resultados e não apenas um resultado determinístico único.

Adicionalmente faz-se uma avaliação comparativa da eficiência dos cinco tipos de elementos verticais drenantes utilizados, sendo feita também uma análise do Método de Asaoka Modificado, quanto à sua forma de utilização, limitações e aplicabilidade ao caso estudado.

Verifica-se ter sido a análise afetada pela forma de aplicação dos carregamentos e pelo desenvolvimento simultâneo de recalques por compressão secundária e primária, o que não é previsto nas hipóteses básicas assumidas pelo método utilizado.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements of the degree of Master of Science (M.Sc.)

**AN ANALYSIS OF SETTLEMENTS BY MODIFIED ASAOKA'S METHOD  
WITH PROBABILISTIC APPROACH**

Celina Aida Bittencourt Schmidt

FEBRUARY, 1992

Thesis Supervisors: Paulo Eduardo Lima de Santa Maria

Marcus Peigas Pacheco

Departament: Civil Engineering

This dissertation presents a back analysis of settlements measured from plates under Sarapuí's Trial Embankment II, by Modified Asaoka's Method, to obtain consolidation coefficients and total settlements of local soft clay layer.

This embankment is placed at Sarapuí River's bank, upon a soft clay layer (Sarapuí's soft clay) and is constituted by seven instrumented sections, five of them with vertical drains and two with no vertical drains.

Because of the availability of results from several plates, a probabilistic approach is applied to the analysis, making it possible to obtain confidence intervals instead of an only deterministic result.

It's also performed a comparative evaluation of the different types of drains and an analysis of Modified Asaoka's Method itself, considering its utilization, limitations and applicability to the problem.

The analysis is affected by the way the loads are applied and by the development of secondary and primary compression at the same time, which is not expected on the basic hypothesis assumed by the method.

## ÍNDICE

	pag
<b>CAPÍTULO I - Introdução</b> .....	1
I.1 - Aterros Experimentais Instrumentados .....	1
I.2 - Drenos Verticais .....	1
I.3 - Enfoque Probabilístico .....	2
I.4 - Objetivos e Organização Deste Trabalho .....	4
 <b>CAPÍTULO II - Revisão de Teorias do Adensamento</b> .....	 6
II.1 - Introdução .....	6
II.2 - Teoria de Terzaghi e Frölich para o Adensamento Unidimensional .....	 7
II.3 - Adensamento Unidimensional com Fluxo Tridimensi- onal .....	 13
II.4 - Adensamento Unidimensional com Fluxo Horizontal (Radial) - Solução de Barron Para Drenos Verti- cais .....	  16
II.5 - Teoria de Adensamento de Mikasa .....	24
II.6 - Métodos Utilizados na Determinação de Coeficien- tes de Adensamento e Recalque Final .....	 27
 <b>CAPÍTULO III - Método de Asaoka Para Interpretação de Medidas de Recalque</b> .....	  41
III.1 - Introdução .....	41
III.2 - Desenvolvimento Teórico .....	41
III.3 - A Construção Gráfica de Asaoka .....	52
III.4 - Tipos de Construções de Asaoka .....	54
III.5 - Considerações e Observações Finais .....	56

III.6 - Extensão Proposta Para o Método de Asaoka Modificado .....	58
<b>CAPÍTULO IV - Descrição do Aterro Experimental .....</b>	<b>64</b>
IV.1 - Introdução .....	64
IV.2 - Aspectos Técnicos Considerados na Elaboração do Ante-Projeto .....	65
IV.3 - Localização e Geometria do Aterro .....	67
IV.4 - Elementos Drenantes Utilizados .....	69
IV.5 - Instrumentação Geotécnica .....	72
IV.6 - Características do Depósito Argiloso .....	73
<b>CAPÍTULO V - Revisão de Conceitos de Probabilidade e Estatística .....</b>	<b>97</b>
V.1 - Introdução .....	97
V.2 - Função Densidade de Probabilidade de Variável Contínua .....	97
V.3 - Índices Estatísticos de uma Distribuição Empírica: Média, Variância e Desvio Padrão .....	98
V.4 - Momentos Estatísticos de uma Distribuição Empírica e Suas Relações com Índices Estatísticos .....	99
V.5 - Distribuição Normal .....	101
V.6 - Inferências Estatísticas em Distribuições Normais .....	101
V.7 - Análise de Regressão Linear .....	105
V.8 - Definição da Distribuição Probabilística de uma Função de Variáveis Randômicas pelo Método de Expansão em Série de Taylor .....	113

<b>CAPÍTULO VI - Aplicação do Método de Asaoka Modificado</b>	<b>119</b>
VI.1 - Introdução .....	119
VI.2 - Descrição do Problema e Considerações .....	120
VI.3 - Dados Necessários .....	121
VI.4 - Construção Gráfica de Asaoka .....	123
VI.5 - Cálculo de Recalques Finais e Coeficientes de Adensamento Pelo Método de Asaoka Modificado ...	138
 <b>CAPÍTULO VII - Discussão dos Resultados</b> .....	 <b>230</b>
VII.1 - Análise dos Recalques .....	230
VII.2 - Análise dos Coeficientes de Adensamento .....	238
 <b>CAPÍTULO VIII - Considerações Finais, Conclusões e Su- gestões Para Pesquisa</b> .....	 <b>256</b>
VIII.1 - Considerações Finais .....	256
VIII.2 - Conclusões .....	257
VIII.3 - Sugestões Para Pesquisa .....	258
 <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	 <b>260</b>

## SIMBOLOGIA UTILIZADA

$c_v$	- Coeficiente de adensamento vertical
$z$	- Variável espacial na direção vertical (profundidade)
$u$	- Excesso de poro-pressão
$t$	- Tempo
$k_v$	- Coeficiente de permeabilidade vertical
$\gamma_w$	- peso específico da água
$e$	- Índice de vazios
$m_v$	- Coeficiente de compressibilidade volumétrico
$a_v$	- Coeficiente de compressibilidade
$\Delta e$	- Variação de índice de vazios
$\Delta \sigma'_v$	- Variação de tensão efetiva vertical
$H_d$	- Altura de drenagem, igual à espessura da camada onde ocorre o processo de adensamento, dividida pelo número de faces drenantes
$H$	- Espessura da camada de argila
$u_0$	- Excesso de poro-pressão inicial
$\Delta \sigma_v$	- Incremento de tensão vertical
$m$	- Número inteiro não negativo
$n$	- número inteiro não negativo
$T_v$	- Fator tempo vertical
$k$	- Coeficiente de permeabilidade
$U_z$	- Grau de adensamento para um ponto da massa de solo, na profundidade $z$
$U_v$	- Grau de adensamento médio vertical
$x$	- variável espacial (direção horizontal)
$y$	- variável espacial (direção horizontal)
$c_h$	- Coeficiente de adensamento horizontal

$k_h$	- Coeficiente de permeabilidade horizontal
$U_h$	- Grau de adensamento médio horizontal
$U_{v,h}$	- Grau de adensamento médio combinado
$d_e$	- Diâmetro de influência de um dreno
$r$	- Coordenada de posição radial
$u$	- Excesso de poro-pressão médio
$r_e$	- Raio de influência de um dreno
$r_w$	- Raio efetivo de um dreno
$d_w$	- Diâmetro efetivo de um dreno
$u_r$	- Excesso de poro-pressão em um ponto de posição radial $r$
$F(n)$	- Função relativa ao diâmetro de influência e o diâmetro efetivo de um dreno
$n$	- Relação entre o diâmetro (ou raio) de influência de um dreno e seu diâmetro (ou raio) efetivo
$T_h$	- Fator tempo horizontal
$S(t)$	- Recalque por adensamento em um tempo $t$
$S_\infty$	- Recalque por adensamento final em um tempo $t=\infty$
$\epsilon_v$	- Deformação volumétrica específica
$\Delta V$	- Variação de volume
$A$	- Area
$j$	- Força de percolação por unidade de volume
$v$	- velocidade de percolação
$i$	- Gradiente hidráulico
$a_1$	- Coeficiente constante
$b$	- Coeficiente constante
$\bar{\epsilon}_v$	- Deformação volumétrica específica no topo da camada



$\epsilon_v$	- Deformação volumétrica específica na base da camada
$\epsilon_{vf}$	- Deformação volumétrica específica final
$\Delta t$	- Intervalo de tempo
$t_j$	- tempo igual ao produto entre $t$ e um índice $j$
$S_j$	- recalque em um tempo $t_j$
$\beta_0$	- Coeficiente linear da reta de Asaoka
$\beta_1$	- Coeficiente angular da reta de Asaoka
$S_{j-1}$	- Recalque em um tempo $t_{j-1}$
$S_0$	- Recalque inicial
$\alpha$	- Coeficiente de forma
$c'$	- Coesão efetiva
$\phi'$	- Ângulo de atrito interno efetivo
LL	- Limite de liquidez
LP	- Limite de plasticidade
W	- Teor de umidade natural
IP	- Índice de plasticidade
$\gamma_t$	- Peso específico total
$\sigma'_{vo}$	- Tensão efetiva vertical <i>in situ</i>
OCR	- Razão de sobre-adensamento (over consolidation ratio)
$c_c$	- Índice de compressão
$c_r$	- Índice de recompressão
CR	- Coeficiente de compressão
RR	- Coeficiente de recompressão
$f_x(x)$	- Função densidade de probabilidade de uma variável contínua $x$
$P(x_1, x_2)$	- Probabilidade de ocorrência de um valor de $x$ entre $x_1$ e $x_2$
N	- Número de observações de uma amostra

$\bar{x}$	- Média de distribuição amostral de x
$x_m$	- Média verdadeira da distribuição populacional de x
$(S_x)^2$	- Variância de distribuição amostral de x
$\Omega$	- Coeficiente de variação
$E[(x-A)^r]$	- Momento de ordem r da distribuição de x em relação a $x=A$
$E(x)$	- Valor esperado ou esperança de x
$\sigma_x$	- Desvio padrão da distribuição de x
$E(\bar{x})$	- Valor esperado ou esperança de $\bar{x}$
$\sigma_{\bar{x}}$	- Desvio padrão da distribuição das médias amostrais de x
Z	- Variável com distribuição normal reduzida ( $Z_m=0; \sigma_z=1$ )
$\hat{x}$	- Estimativa da média da distribuição populacional de x, considerando o princípio da máxima probabilidade
a	- Coeficiente linear da reta de regressão
b	- Coeficiente angular da reta de regressão
y	- Variável dependente de x
MSE	- Média quadrática dos erros
$\epsilon_1$	- Desvio, na observação, entre os valores esperado e obtido
$\Gamma$	- Relação $c_h/c_v$
$k_0$	- Coeficiente de empuxo no repouso
$\sigma'_{vf}$	- Tensão efetiva vertical final
$e_f$	- Índice de vazios final
$e_{\sigma'_{v0}}$	- Índice de vazios correspondente a $\sigma'_{v0}$
$k_{on}$	- Coeficiente de empuxo no repouso para um solo normalmente adensado

- 6            - Parâmetro que regula a velocidade com que a  
compressão secundária se manifesta

## CAPITULO I

### Introdução

#### I.1 Aterros Experimentais Instrumentados

Na prática, os aterros experimentais instrumentados são construídos para responder a algumas questões que se apresentam por ocasião da elaboração do projeto de uma obra. Essas questões podem concerner à estabilidade da obra, amplitude dos recalques e deslocamentos laterais do solo de fundação, velocidade de recalques e eficácia dos procedimentos de construção no local considerado.

A construção de aterros experimentais tem sido frequente em diversos países, impulsionada pelos centros de pesquisa de órgãos públicos ou universidades, havendo dezenas de casos descritos na literatura especializada internacional.

O aterro experimental deve ser edificado em local representativo do solo de fundação da obra, com dimensões as mais próximas possíveis daquelas da obra a ser realizada. O local escolhido para a construção do aterro deve ser objeto de estudos prévios detalhados, a fim de que se possam interpretar com clareza as observações feitas, tornando possível prever o comportamento futuro da obra real.

A análise de dados obtidos por instrumentação de aterros experimentais têm seus resultados tradicionalmente utilizados para comparação com aqueles calculados teoricamente com

aplicação da teoria adequada. O surgimento de diversos métodos, baseados nas teorias do adensamento, possibilitando a realização de retroanálises de medições de campo, quer sejam da dissipação de excesso de poro-pressões, quer sejam da evolução de recalques com o tempo, veio a reafirmar a importância da construção de aterros experimentais instrumentados.

Os aterros experimentais, desde que projetados e construídos criteriosamente e instrumentados e analisados com eficiência, constituem uma ferramenta poderosa para a previsão do comportamento da obra para a qual ele foi construído.

## **I.2 Drenos Verticais**

A utilização de drenos verticais em solos compressíveis tem sido feita intensamente nos últimos 60 anos. De acordo com MAGNAN (1983), Daniel E. Moran em 1925 propôs uma metodologia (patenteada em 1926) para utilização de drenos de areia para estabilização de depósitos de solos moles e aumento da velocidade de adensamento.

Estes elementos, convenientemente espaçados, induzem a uma redistribuição na rede de fluxo, com conseqüente redução nas trajetórias das partículas de água no interior da camada em adensamento, obtendo-se assim uma diminuição no tempo final do processo.

A construção de aterros sobre drenos verticais tem sido utilizada em vários projetos com o objetivo de acelerar os

recalques, permitindo a liberação da obra em menor tempo.

O projeto de instalação de drenos verticais é governado por uma série de fatores, tais como: o conhecimento prévio das características do solo a adensar através de ensaios de campo e de laboratório, o conhecimento das características do dreno e a aplicação da teoria do adensamento adequada.

Diversos tipos de técnicas construtivas são utilizadas para as duas categorias básicas de drenos verticais: drenos de areia e drenos sintéticos. É impossível proceder-se à instalação de drenos por qualquer método sem causar perturbações no solo. As categorias e técnicas construtivas dos drenos verticais vêm sendo avaliadas comparativamente quanto à eficiência por vários pesquisadores. A utilização de diferentes tipos de drenos e técnicas construtivas no Aterro Experimental II do Sarapuí visou um estudo comparativo dos mesmos.

### **I.3 Enfoque Probabilístico**

A análise probabilística em problemas de engenharia vem sendo cada vez mais difundida. As decisões, particularmente em engenharia geotécnica, são baseadas em informações incertas, e os resultados obtidos por análises determinísticas podem ser completamente enganosos. Essas incertezas se devem, de um modo geral, ao método de análise adotado e suas hipóteses simplificadoras, e aos erros associados à determinação das propriedades da camada de solo ou carregamentos aplicados.

O enfoque probabilístico é uma ferramenta útil na análise dos problemas de engenharia geotécnica. Com o emprego de técnicas de análise probabilística, o engenheiro pode, junto com sua capacidade de julgamento e experiência, ao menos fazer uma proposição para a confiabilidade de uma previsão, expressando as dúvidas em termos de probabilidade numérica.

#### I.4 Objetivos e Organização Deste Trabalho

Este trabalho pretende avaliar, através de retroanálise dos dados obtidos das medições de recalque efetuadas nas placas do Aterro Experimental II do Sarapuí, os coeficientes de adensamento vertical e horizontal, além do recalque final por adensamento, da camada de argila mole sujeita ao carregamento provocado pelo aterro ali construído.

Pretende-se ainda avaliar a eficiência dos diversos tipos e técnicas construtivas dos elementos verticais drenantes utilizados, através de uma análise comparativa, buscando-se para isso uma metodologia simples e eficaz.

O método utilizado é o de Asaoka Modificado por Magnan e Deroy, sendo a avaliação da aplicabilidade e da eficácia do mesmo para o problema estudado também objeto deste estudo.

A proposta de aplicação de um enfoque probabilístico na análise dos recalques do Aterro Experimental II do Sarapuí vem a ser uma contribuição adicional aos estudos relativos à aplicação do Método de Asaoka Modificado na análise de recalques medidos no campo.

O capítulo II apresenta uma revisão de teorias do adensamento tradicionais, que servem como base para grande parte dos métodos destinados à análise de problemas de adensamento. Faz-se também, nesse capítulo, uma breve revisão de alguns métodos disponíveis para estudos de adensamento em camadas compressíveis.

O capítulo III descreve o Método de Asaoka Modificado, utilizado neste trabalho.

O capítulo IV descreve as características do Aterro Experimental II, bem como da camada de argila mole sobre a qual aquele foi construído.

O capítulo V apresenta uma breve revisão de conceitos de probabilidade e estatística, para melhor entendimento da aplicação de um enfoque probabilístico.

O capítulo VI mostra a aplicação do Método de Asaoka Modificado ao problema estudado e apresenta os resultados obtidos para coeficientes de adensamento e recalques finais por adensamento.

O capítulo VII apresenta a discussão dos resultados apresentados no capítulo VI.

O capítulo VIII apresenta as considerações finais, conclusões e sugestões para pesquisa.



## CAPÍTULO II

### Revisão de Teorias do Adensamento

#### II.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma revisão das teorias clássicas utilizadas na análise de problemas de adensamento, que servem como base teórica para o desenvolvimento e aplicação do Método de Asaoka, objeto deste estudo.

Chama-se adensamento ao processo lento e gradual através do qual, em uma argila saturada, ocorre uma redução de volume do solo, devida à compressão de seu arcabouço sólido, volume este igual ao volume de água dos vazios expulsa no processo.

Quando um carregamento é aplicado a uma massa de solo compressível saturado, este é inicialmente suportado pela água dos poros. O acréscimo de tensão resultante na água é chamado de excesso de poro-pressão. Se a água drena dos poros, o excesso de poro-pressão vai sendo dissipado enquanto um incremento de tensão vai sendo transferido para a estrutura do solo, ocasionando um acréscimo de tensão efetiva.

Na realidade, o adensamento é composto do fenômeno de expulsão da água, no qual as poro-pressões geradas são dissipadas até atingirem um valor nulo, denominado adensamento primário; e de um fenômeno através do qual o solo continua se comprimindo após a total dissipação do excesso de

poro-pressão, ou seja, a uma tensão efetiva vertical constante, denominado adensamento secundário.

## II.2 Teoria de Terzaghi e Frölich Para o Adensamento Unidimensional

A equação diferencial que rege o adensamento de solos compressíveis submetidos a carregamentos verticais foi pela primeira vez estabelecida por Karl Terzaghi, para condições de deformação unidimensional e fluxo vertical, sendo que posteriormente, diversos trabalhos foram desenvolvidos por outros autores, vindo a complementar a teoria de Terzaghi.

O adensamento unidimensional ocorre no campo para os casos em que a espessura da camada compressível é pequena em relação às dimensões da área carregada, condição esta reproduzida em laboratório pelo ensaio oedométrico.

A equação diferencial do adensamento estabelecida por TERZAGHI (1923) baseia-se em hipóteses simplificadoras, nem sempre verdadeiras, desconsiderando também o efeito de compressão secundária ocorrendo simultaneamente com o adensamento primário, sendo que este muitas vezes não deve ser desprezado por serem consideráveis as deformações a ele associadas.

As hipóteses básicas consideradas são (TERZAGHI, 1943):

(a) O solo é homogêneo.

(b) Os vazios do solo são inteiramente preenchidos por fluido intersticial (água).

(c) As compressibilidades da água e dos grãos do solo são desprezíveis em relação à compressibilidade do esqueleto sólido.

(d) É válida a lei de Darcy.

(e) O coeficiente de permeabilidade  $k$  é constante.

(f) O solo é confinado lateralmente (compressão unidimensional e fluxo unidirecional).

(g) As tensões totais e efetivas são as mesmas para cada ponto, em qualquer seção horizontal do solo e para cada estágio do processo de adensamento.

(i) A variação do índice de vazios é linearmente proporcional à variação da tensão efetiva.

Com base nessas hipóteses chega-se à equação fundamental do adensamento unidimensional, que como se sabe é:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{II.1})$$

onde:

$u$  é o excesso de poro-pressão em um tempo  $t$ ;

t é o tempo contado a partir da aplicação do carregamento;

z é a distância entre a superfície da camada de argila e o ponto considerado (profundidade);

$c_v$  é o coeficiente de adensamento vertical.

O coeficiente  $c_v$  é dado por:

$$c_v = \frac{k_v(1+e)}{\gamma_w \cdot a_v} = \frac{k_v}{\gamma_w \cdot m_v} \quad (\text{II.2})$$

onde:

$k_v$  é o coeficiente de permeabilidade vertical;

$\gamma_w$  é o peso específico da água;

e é o índice de vazios;

$m_v$  é o coeficiente de compressibilidade volumétrico;

$a_v$  é o coeficiente de compressibilidade dado por:

$$a_v = \frac{-\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \quad (\text{II.3})$$

onde:

$\Delta e$  é a variação do índice de vazios;

$\Delta\sigma_v$  é a variação da tensão efetiva vertical.

No caso de adensamento com drenagem dupla (duas faces drenantes), a espessura da camada,  $H$ , é igual a  $2H_a$ , sendo  $H_a$  o mais longo caminho de drenagem.

As condições de fronteira para o caso de adensamento unidimensional, com drenagem dupla, por aplicação de carregamento constante ao longo da profundidade  $z$ , podem ser expressas como se segue:

(1) Há completa drenagem no topo da camada.

(2) Há completa drenagem na base da camada.

(3) O excesso de poro pressão inicial  $u_0$  é igual ao incremento de tensão  $\sigma_v$ , sendo  $u_0$  constante ao longo da profundidade  $z$ .

As expressões matemáticas para essas condições de fronteira são (ver figura II.1):

(1) Para  $z=0$ ,  $u=0$ ,  $t=\text{qualquer}$  ou  $u(z=0,t)=0$

(2) Para  $z=2H_a$ ,  $u=0$ ,  $t=\text{qualquer}$  ou  $u(z=2H_a,t)=0$

(3) Quando  $t=0$ ,  $u=u_0$ ,  $z=\text{qualquer}$  ou  $u(z,t=0)=u_0$

A solução da equação (II.1), obtida por TERZAGHI E FRÖLICH (1936) para as condições de fronteira do problema, é:

$$u(z,t) = \frac{4u_0}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)} \exp \left[ -(2m+1)^2 \frac{\pi^2}{4} T_v \right] \cdot \sin \frac{(2m+1) \cdot \pi \cdot z}{2H_d} \quad (\text{II.4})$$

onde:

$u_0$  é o excesso de poro pressão inicial, constante ao longo da profundidade  $z$ ;

$m$  é um número inteiro não negativo;

$H_d$  é a altura de drenagem, definida por:

$$H_d = \frac{\text{espessura da camada}}{\text{nº de faces drenantes}} = \frac{H}{n}$$

$$T_v \text{ é o fator tempo vertical dado por: } T_v = \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \quad (\text{II.5})$$

Como uma medida do grau da evolução do processo de adensamento, define-se por grau de adensamento e denota-se por  $U_z$ , a razão entre a variação do índice de vazios em um instante  $t$  e a variação total do índice de vazios a ocorrer a tempo infinito, para um carregamento aplicado.

Com base na hipótese (i) anteriormente mostrada e admitindo-se que a um acréscimo de tensão efetiva vertical ( $\Delta \sigma'_v$ ) corresponde um igual decréscimo do excesso de poro-pressão,

o grau de adensamento vertical  $U_z$ , na profundidade  $z$ , em um tempo  $t$ , pode ser definido pela relação:

$$U_z = \frac{u_0 - u}{u_0} = 1 - \frac{u}{u_0} \quad (\text{II.6})$$

onde  $u_0$  é o excesso de poro-pressão inicial e  $u$  o excesso de poro-pressão em um tempo  $t$  qualquer.

Substituindo-se em (II.6) o valor de  $u$  dado por (II.4), e fazendo  $M = (2m+1)\pi/2$ , tem-se:

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} [\text{sen}(M.z/H_d)] \exp(-M^2.T_v) \quad (\text{II.7})$$

Para um dado tempo  $t$ , a porcentagem ou grau de adensamento médio vertical  $U_v$  ao longo de toda a camada de espessura  $H$ , será, para  $u_0$  constante, igual ao valor médio de  $U_z$  ao longo de  $z$ , ou seja:

$$U_v = \frac{1}{H} \int_0^H U_z . dz = 1 - \frac{\frac{1}{H} \int_0^H u . dz}{\frac{1}{H} \int_0^H u_0 . dz}$$

$$U_v = 1 - \frac{\int_0^H u . dz}{\int_0^H u_0 . dz} \quad (\text{II.8})$$

cuja solução é:

$$U_v = \frac{S(t)}{S_\infty} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad (\text{II.9})$$

Podendo ser expressa por:

$$U_v = \frac{S(t)}{S_\infty} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{8}{\pi^2 (2m+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2}{4} (2m+1)^2 T_v\right] \quad (\text{II.10})$$

onde  $S(t)$  é o recalque em um tempo  $t$  e  $S_\infty$  é o recalque final ou a tempo infinito.

A expressão (II.9) pode ser representada ainda pelas seguintes expressões empíricas (TAYLOR, 1948):

$$\text{para } U_v < 60\% : T_v = (\pi/4) \cdot U_v^2 \quad (\text{II.11})$$

$$\text{para } U_v > 60\% : T_v = -0,9332 \cdot \log(1-U_v) - 0,0851 \quad (\text{II.12})$$

### II.3 Adensamento Unidimensional Com Fluxo Tridimensional

Nos processos de adensamento que implicam em fluxo tridimensional, a dissipação do excesso de poro-pressões se dá por drenagem onde o fluxo ocorre segundo uma direção com componentes vertical e horizontais.

A equação diferencial do adensamento unidimensional com fluxo tridimensional em meios isotrópicos pode ser escrita em coordenadas cartesianas, como (TERZAGHI, 1943):



$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.13})$$

Admitindo-se o efeito de anisotropia e considerando-se como diferentes as permeabilidades vertical e horizontal, tem-se:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{II.14})$$

onde  $c_h$  e  $c_v$  são respectivamente os coeficientes de adensamento horizontal e vertical,  $x$  e  $y$  as duas direções horizontais e  $z$  a direção vertical.

O coeficiente de adensamento horizontal  $c_h$  é dado pela seguinte expressão:

$$c_h = \frac{k_h}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (\text{II.15})$$

onde:

$k_h$  é o coeficiente de permeabilidade horizontal, sendo os outros parâmetros os mesmos definidos anteriormente.

Se o processo de adensamento é simétrico com relação a um eixo vertical, é conveniente substituir as coordenadas cartesianas por coordenadas cilíndricas, adotando-se a variável  $r$  na direção radial (horizontal) e a variável  $z$  na direção vertical. Obtém-se por meio desta substituição a seguinte equação:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{II.16})$$

onde  $r$  é a coordenada de posição radial de um ponto genérico.

CARRILLO (1942) demonstrou que o processo de adensamento com fluxo tridimensional pode ser decomposto em um fluxo radial plano e um fluxo linear vertical, mostrando como soluções unidimensionais e bidimensionais da equação diferencial do adensamento podem ser combinadas fornecendo soluções para vários tipos de problemas de fluxo bidimensional ou tridimensional.

Se  $U_h$  é o grau de adensamento médio de uma camada de argila devido a uma drenagem horizontal (radial) plana em um dado instante  $t$  e  $U_v$  é o grau de adensamento médio devido a uma drenagem vertical linear no mesmo instante, o grau de adensamento médio  $U_{v,h}$  devido a uma drenagem combinada vertical e horizontal é determinado, a partir do teorema de CARRILLO (1942), pela equação abaixo (TERZAGHI, 1943):

$$(1 - U_{v,h}) = (1 - U_v) \cdot (1 - U_h) \quad (\text{II.17})$$

---

\*Nota : Costuma-se utilizar a notação  $c_r$  para o coeficiente de adensamento horizontal na equação apresentada em coordenadas cilíndricas, (coeficiente de adensamento radial). Nesta tese será mantida a notação  $c_h$ , em concordância com o trabalho de BARRON (1948).

## II.4 Adensamento Unidimensional Com Fluxo Horizontal (Radial) - Solução de Barron Para Drenos Verticais

O caso de adensamento por compressão vertical devido a drenagem horizontal foi tratado de forma similar ao caso de adensamento devido a fluxo vertical, sendo este tratamento teórico uma extensão da Teoria do Adensamento de Terzaghi. A solução para este caso foi apresentada inicialmente por L. Rendulic em 1935 (RICHART, 1959).

Segundo RICHART (1959), as primeiras informações acerca do modelo para este caso foram dadas por TERZAGHI (1943). Mais tarde, BARRON (1948) baseando-se na teoria de Terzaghi desenvolveu a teoria do adensamento para o projeto de instalação de drenos verticais de areia, apresentando um estudo abrangente incluindo soluções levando em consideração desvios das condições ideais de drenagem.

Drenos verticais são colunas verticais de areia (ou outro material permeável) introduzidas através de uma camada compressível, com espaçamento suficiente para que o mais longo caminho de drenagem horizontal seja inferior ao mais longo caminho de drenagem vertical, de forma que se possa aumentar a velocidade com que se processam os recalques.

BARRON (1948) no desenvolvimento de sua teoria considerou as duas condições extremas de deformações verticais que podem ocorrer em uma camada de solo, (a) Deformações Verticais Livres ("Free Vertical Strains") resultantes de uma distribuição uniforme de carregamento na superfície da ca-

mada e, (b) Deformações Verticais Iguais ("Equal Vertical Strains") resultantes da imposição da mesma deformação vertical em todos os pontos da superfície da camada. BARRON apresentou ainda, para ambas as condições de drenagem, soluções levando em consideração o efeito de "smear" (amolçamento do solo na periferia do dreno) e o efeito de resistência do próprio dreno ao fluxo.

O efeito de "smear" (ou de amolçamento) é causado pelas operações de instalação de drenos no campo, as quais introduzem perturbações no solo nas adjacências da região trabalhada. Sua influência pode ser mais ou menos intensa dependendo da sensibilidade do solo e do método empregado para execução dos drenos.

O preenchimento da cavidade do dreno, mesmo com material permeável, resulta em alguma resistência do dreno ao fluxo ascendente da água expelida, podendo esta influência ser maior ou menor de acordo com a seção do dreno e intensidade do fluxo.

Para drenos ideais esses efeitos são ignorados. As formulações apresentadas neste trabalho são aplicáveis a drenos ideais, sendo que considerações sobre os efeitos dos desvios das condições ideais de drenagem podem ser encontrados em BARRON (1948), RICHART (1959), SANTA MARIA (1977) e outros trabalhos sobre o assunto.

As hipóteses básicas consideradas por BARRON (1948) em seu estudo são:

(a) Todo o carregamento vertical é inicialmente suportado pelo excesso de pressão na água intersticial;

(b) Todas as deformações de compressão se processam na direção vertical;

(c) A distribuição de drenos mais econômica é aquela apresentada na figura II.2 (b);

(d) A zona de influência de cada dreno em um dado plano é um círculo conforme figura II.2;

(e) A distribuição de cargas sobre esta área é uniforme.

Para uma malha triangular de drenos, a zona de influência de cada dreno em um dado plano tem forma hexagonal, como se vê na figura II.2 (b). Aproximando-se a forma hexagonal à de um círculo de área equivalente, cujo diâmetro é  $d_a$ , este pode ser admitido como o limite externo da zona de influência de cada dreno. Pode-se então considerar que o fluxo radial, e o adensamento resultante, ocorrem na massa de solo contida entre o diâmetro de influência,  $d_a$ , e o diâmetro do dreno,  $d_w$ , como mostrado na figura II.2(c)

De forma análoga, para uma malha quadrangular de drenos, tem-se que o diâmetro de influência  $d_a$  é o diâmetro do círculo de área equivalente à área de influência quadrangular

como mostra a figura II.2(a).

Procedendo-se ao cálculo do diâmetro de influência do dreno com base no que foi exposto, tem-se

para malha quadrangular:

$$\frac{\pi d_e^2}{4} = s^2 \quad d_e = 1,13 s \quad (\text{II.18})$$

para malha triangular:

$$\frac{\pi d_e^2}{4} = \frac{s^2 \sqrt{3}}{2} \quad d_e = 1,05 s \quad (\text{II.19})$$

sendo  $s$  o espaçamento entre drenos.

Em princípio, de acordo com a hipótese básica c), a distribuição triangular de drenos seria a mais econômica. Porém, de acordo com KJELLMAN (BARRON, 1948), a esse respeito, a diferença entre a malha triangular e quadrangular é pouco significativa.

Para o adensamento de camadas compressíveis com drenos verticais, que envolve fluxo simultâneo nas direções vertical e horizontais, o resultado final pode ser obtido a partir da combinação das duas condições de fluxo analisadas isoladamente, como dito anteriormente. Assim, a equação diferencial do adensamento para drenagem horizontal, pode ser analisada isoladamente.

A equação diferencial do adensamento para drenagem puramente horizontal é:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.20})$$

Considerando-se o fluxo simétrico em relação a um eixo vertical, a equação (II.20) pode ser expressa em coordenadas cilíndricas sob a forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (\text{II.21})$$

A partir da equação (II.21) BARRON (1948) estabeleceu as soluções para drenos ideais de areia para as duas condições extremas de deformações na superfície de uma camada compressível anteriormente citadas:

(a) Condição de deformações verticais livres

As condições de fronteira supostas para este caso são:

(1) o excesso de poro-pressões inicial,  $u_0$ , é uniforme através da massa de solo, (2) o excesso de poro-pressão na superfície do dreno ( $r=r_w$ ) é zero quando  $t>0$ , e (3) o raio limite externo de influência do dreno,  $r_e$ , define uma superfície impermeável, ou, por causa da simetria, nenhum fluxo ocorre nessa fronteira, o que significa que  $\partial u / \partial r = 0$  quando  $r=r_e$ . Estas condições subentendem que os recalques na superfície não mudam a distribuição de cargas na massa de solo. O carregamento aplicado na superfície é assumido

como perfeitamente flexível, sendo desprezado o efeito da variação das deformações verticais na distribuição de tensões em uma direção radial.

A solução analítica para esta condição limite está apresentada em BARRON (1948) e RICHART (1959), não sendo aqui apresentada por não ser de relevância para o presente trabalho.

#### (b) Condição de deformações verticais iguais

Neste caso, supõe-se que o carregamento é aplicado por um sistema rígido o qual obriga a que as deformações na superfície da massa de solo sejam iguais. A distribuição inicial do excesso de poro-pressões correspondente a esta condição não é uniforme. A solução da equação do adensamento para esta condição é consideravelmente mais simples que a solução de deformações verticais livres.

A partir da equação do adensamento para drenagem radial pura (equação (II.21)), tem-se , para a condição de deformações verticais iguais:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = c_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (\text{II.22})$$

onde:

$\bar{u}$  é o excesso médio de poro-pressão a um tempo  $t$ .



A solução da equação (II.22) para um ponto genérico de posição radial  $r$ , em relação ao centro de um dreno é:

$$u_r = \frac{4\bar{u}}{d_e^2 F(n)} \cdot \left[ r_e^2 \ln \left( \frac{r}{r_w} \right) - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right] \quad (\text{II.23})$$

onde:

$r_e$  é o raio de influência de um dreno de areia ou o seu equivalente para um dreno pré-fabricado;

$r_w$  é o raio efetivo de um dreno de areia ou o seu equivalente para um dreno pré-fabricado;

$u_r$  é o excesso de poro-pressão em um ponto genérico de posição  $r$  em um dado tempo  $t$  com dissipação devido ao fluxo horizontal (radial);

$d_e$  é o diâmetro de influência de um dreno de areia ou o seu equivalente para um dreno pré-fabricado;

$F(n)$  é uma função relativa ao diâmetro de influência de um dreno e ao seu diâmetro efetivo, dada por:

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} \quad (\text{II.24})$$

$$\text{sendo, } n = \frac{r_e}{r_w} = \frac{d_e}{d_w} \quad (\text{II.25})$$

A relação entre o excesso de poro-pressão médio  $\bar{u}$ , entre  $r=r_w$  e  $r=r_a$ , e o excesso de poro-pressão inicial  $u_o$  é dada por:

$$\frac{\bar{u}}{u_o} = \exp \left[ \frac{-8 T_h}{F(n)} \right] \quad (\text{II.26})$$

onde:

$$T_h \text{ é o fator tempo horizontal dado por: } T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_a^2} \quad (\text{II.27})$$

Sendo então o grau de adensamento médio para drenagem radial (horizontal) dado pela expressão:

$$U_h = \frac{S(t)}{S_\infty} = 1 - \exp \left[ \frac{-8 T_h}{F(n)} \right] \quad (\text{II.28})$$

Na hipótese de adensamento por fluxo radial com deformações livres, o adensamento se processa mais rapidamente no solo adjacente ao dreno. Essa diferença na velocidade de adensamento desenvolve recalques diferenciais na superfície e deformações cisalhantes no interior da massa de solo. Para a condição de deformações livres, entretanto, supõe-se que esses efeitos não influenciam a distribuição das tensões impostas pelo carregamento. Na realidade, porém esses efeitos acarretam uma redistribuição, tanto maior quanto maior o arqueamento desenvolvido no material colocado sobre a camada compressível (material do aterro, por exemplo). O caso extremo seria aquele no qual o processo de arqueamento re-

distribuiria o carregamento de tal forma que todas as deformações verticais seriam iguais e não se desenvolveriam recalques diferenciais, ou seja, condição de deformações verticais iguais (BARRON, 1948).

De acordo com RICHART (1959), a diferença entre os resultados obtidos para as duas condições extremas de deformações são pequenas, particularmente para valores de  $n$  ( $n=r_a/r_w$ ) maiores que 10. Para  $n=5$ , ainda segundo aquele autor, a diferença é maior apenas no início do processo de adensamento, sendo praticamente inexistente para  $U>50\%$ . Assim, costuma-se utilizar a solução para deformações verticais iguais qualquer que seja a natureza do sistema de carregamento aplicado, devido à sua forma muito mais simples. Esta solução é a utilizada como base para o Método de Asaoka Modificado por Magnan e Deroy, que será apresentado no capítulo III desta tese.

## II.5 Teoria do Adensamento de Mikasa

MIKASA (1963) analisou o caso de adensamento unidimensional onde o coeficiente de adensamento  $c_v$  é constante, porém o coeficiente de permeabilidade  $k$  e o coeficiente de compressibilidade  $m_v$  variam proporcionalmente durante o processo de adensamento.

Baseado nessas hipóteses, MIKASA (1963) propõe uma equação mais geral que a proposta por TERZAGHI (1923), expressa em termos da deformação volumétrica específica  $\epsilon_v$  ao invés do excesso de poro-pressão  $u$ .

Considere-se um elemento de solo de espessura  $dz$  e seção  $A$  (figura II.3). Sendo  $d\epsilon_v$  a deformação específica volumétrica de compressão no intervalo de tempo  $dt$ , a variação do volume do elemento no tempo  $dt$  é:

$$\Delta V = d\epsilon_v(A.dz) = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} dt(A.dz) \quad (\text{II.29})$$

O volume de água que entra no elemento de solo no tempo  $dt$  é  $v.A.dt$ , onde  $v$  é a velocidade aparente do fluxo de água. O volume de água que sai do elemento de solo no tempo  $dt$  é  $(v+(\partial v/\partial z).dz).A.dt$ . Assumindo-se que a argila esteja saturada, que as partículas de solo e a água dos poros sejam incompressíveis e que o fluxo seja unidirecional (direção  $z$ ), tem-se que a variação do volume de água no elemento no tempo  $dt$  é:

$$\Delta V = \frac{\partial v}{\partial z}.dz.A.dt \quad (\text{II.30})$$

Igualando-se (II.29) a (II.30) :

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial z} \quad (\text{II.31})$$

Assumindo-se que a velocidade  $v$  segue a lei de Darcy:

$$v=k.i \quad (\text{II.32})$$

sendo a força de percolação por unidade de volume ( $j$ ) sobre

a estrutura da argila:

$$j = i \cdot \gamma_w \quad (II.33)$$

desprezando-se o peso próprio do elemento, a única força agindo na estrutura da argila será a força de percolação  $j$ , então:

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial z} = j \quad (II.34)$$

Combinando-se (II.32), (II.33) e (II.34), obtém-se:

$$v = \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \quad (II.35)$$

Assumindo-se que  $\epsilon_v$  e  $\sigma'$  têm uma relação funcional e  $m_v$  pode ser definido para cada valor de  $\epsilon_v$  ou  $\sigma'$  por:

$$m_v = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial \sigma'} \quad , \quad (II.36)$$

pode-se escrever:

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial z} = \frac{\partial \sigma'}{\partial \epsilon_v} \cdot \frac{\partial \epsilon_v}{\partial z} \quad (II.37)$$

ou

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial z} = \frac{1}{m_v} \cdot \frac{\partial \epsilon_v}{\partial z} \quad (\text{II.38})$$

Substituindo-se (II.38) em (II.35), obtém-se:

$$v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \cdot \frac{\partial \epsilon_v}{\partial z} = c_v \cdot \frac{\partial \epsilon_v}{\partial z} \quad (\text{II.39})$$

o que aplicado em (II.31) fornece a equação do adensamento em termos de deformações volumétricas específicas:

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( c_v \cdot \frac{\partial \epsilon_v}{\partial z} \right) \quad (\text{II.40})$$

E em sendo  $c_v$  constante, tem-se :

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 \epsilon_v}{\partial z^2} \quad (\text{II.41})$$

## II.6 Métodos Utilizados na Determinação de Coeficientes de Adensamento e Recalque Final

Neste item faz-se um breve relato de alguns métodos utilizados na determinação dos coeficientes de adensamento horizontal (radial) e vertical e recalques finais em camadas de solo compressível submetidas a carregamentos externos.

Segundo MAGNAN (1983), as publicações que apresentam resultados obtidos em observações reais de campo, onde se compara a eficácia de diferentes processos de drenagem entre si

e entre zonas de referência sem drenos, revelam a ausência de uma metodologia de aplicação geral para análise da eficácia dos sistemas de drenagem radial, a qual seria bastante desejável.

Os autores, em geral, concentram seu interesse na evolução de recalques e dissipação de excesso de poro-pressões, sendo as observações de campo comparadas aos cálculos fundamentados em ensaios de campo ou laboratório.

A maior parte dos autores analisa a eficácia dos drenos comparando as curvas de recalque e dissipação de excesso de poro-pressões observadas no terreno ao longo do tempo às curvas calculadas. As curvas teóricas são em geral provenientes da solução de BARRON para drenos ideais em solo homogêneo. Os parâmetros de adensamento do solo são provenientes de ensaios de campo, ensaios de laboratório ou de combinação de ensaios de compressibilidade em laboratório e de permeabilidade em campo.

A seguir são apresentados métodos que utilizam dados obtidos em ensaios, bem como métodos que utilizam dados provenientes de observações em obras reais.

#### II.6.1 Determinação de Coeficientes de Adensamento

Além do método simples que consiste em fazer uma série de cálculos de recalques por adensamento para diferentes valores de coeficientes de adensamento horizontal ou vertical, escolhendo-se o valor que permite o melhor ajuste à curva

de recalques ou excesso de poro-pressões medidos, existem diversos outros métodos para determinação do coeficiente de adensamento do solo. Esses métodos são, em geral, fundamentados em transformações das soluções analíticas da equação do adensamento.

JOHNSON (1970), citado por MAGNAN (1983) passou em revista os métodos disponíveis à época: método de GOULD (1949), transposto para o caso de drenagem radial por MORAN et al. (1958); método de ESCARIO E URIEL (1961), utilizado igualmente por ABOSHI E MONDEN (1963); método de SCOTT (1961) para ensaios de laboratório, utilizado por ADACHI E MIYRAHAMA (1963) para análise de medidas de recalque sob um aterro experimental; e método de MATSUO (1953), igualmente utilizado por ADACHI E MIYRAHAMA (1963).

Os métodos de TAYLOR ( $\sqrt{t}$ ) e CASAGRANDE ( $\log t$ ), utilizados para a determinação do coeficiente de adensamento em ensaios de adensamento unidimensional (oedométrico) podem ser adaptados para a análise do coeficiente de adensamento horizontal (radial), como realizado por SEYMOUR-JONES (1978).

Surgiram mais tarde os métodos de ELLSTEIN (1971), LONG E CAREY (1978), e o método de análise gráfica de recalques derivado do trabalho de ASAOKA (1978), modificado por MAGNAN E DEROY (1980).

O método de GOULD (1949) para análise de curvas de adensamento unidimensional, supõe que se possa avaliar, a partir dos recalques ou excesso de poro-pressões, o grau de aden-



samento U em dois instantes  $t_1$  e  $t_2$ . Determinando-se então os valores de fatores tempo  $T_1$  e  $T_2$  correspondentes aos graus de adensamento  $U_1$  e  $U_2$ , obtém-se o valor do coeficiente de adensamento vertical com utilização das expressões:

$$c_v = \frac{\Delta T_v}{\Delta t} \cdot H_d^2$$

ou

$$c_h = \frac{\Delta T_h}{\Delta t} \cdot d_a^2$$

obtidas respectivamente a partir das equações (II.5) e (II.27) para os fatores tempo vertical e horizontal.

Em caso de drenagem horizontal e vertical simultâneas considera-se uma relação constante entre  $c_h$  e  $c_v$

O método de ESCARIO E URIEL (1961) foi desenvolvido para análise de ensaios de adensamento radial em aparelho triaxial. Este método prevê a construção de curvas representativas da variação das poro-pressões com o tempo. A inclinação  $\text{tg}(\alpha_1)$  da parte linear da curva  $\log(1-U_h)$  x tempo, em relação ao eixo dos tempos, permite que se calcule o coeficiente de adensamento horizontal com a utilização da forma exponencial da solução de BARRON (1948) para drenagem radial, que gera a seguinte relação:

$$c_h = \frac{0,434.d_e^2.F(n).tg(\alpha_1)}{8}$$

Esse método pode ser também utilizado para análise de evolução de poro-pressões no campo, para valores correspondentes por exemplo, a medidas efetuadas por um piezômetro equidistante dos drenos.

O método proposto por SCOTT para curvas de adensamento unidimensional em ensaio oedométrico fundamenta-se na solução de TERZAGHI. SCOTT desenvolveu diagramas  $U(T)/U(NT) \times T$ , onde  $U$  é o grau de adensamento,  $T$  é o fator tempo e  $N$  é um número real maior que um, para diversos valores de  $N$ . Conhecendo-se os valores de recalques  $S_0$  (recalque inicial),  $S(t)$  (recalque em um tempo  $t$ ) e  $S(NT)$  (recalque em um tempo  $Nt$ ) pode-se obter a relação  $U(T)/U(NT)$ . Entrando no diagrama com o valor dessa relação, obtém-se na curva correspondente ao valor de  $N$ , o valor de  $T$  que permitirá, sabendo-se o valor de  $t$ , o cálculo do coeficiente de adensamento. SCOTT elaborou diagramas para os casos de drenagem vertical e horizontal.

O método proposto por MATSUO foi também desenvolvido para a análise do adensamento unidimensional, sendo fundamentado na análise da forma e deslocamento das isócronas de poro-pressão durante intervalos de tempo  $dt$ .

O método de ELLSTEIN se presta à análise das curvas de recalques medidos ao longo do tempo para o caso de adensamento unidimensional. Derivando-se em relação ao tempo a forma

aproximada da solução clássica de TERZAGHI (equação II.10, para  $m=0$ ), obtém-se a expressão da velocidade de recalque em um tempo  $t$ , em função de  $c_v$ . Determinando-se a velocidade de recalque em dois instantes  $t_1$  e  $t_2$ , o coeficiente de adensamento é obtido pela relação entre as diferenças de velocidades e as diferenças de recalque em dois instantes  $t_1$  e  $t_2$ , ou seja:

$$c_v = \frac{4.H_d^2}{\pi^2} \cdot \frac{\Delta(ds/dt)}{\Delta S(t)}$$

O método de LONG E CAREY permite a determinação de um coeficiente de adensamento combinado  $c_{v,h}$  (vertical+horizontal), no caso de uma camada de solo com drenagem vertical e radial simultâneas. Ele é fundamentado na hipótese de que para  $T_h > 0,1$  ( $T_h$  = fator tempo horizontal), as curvas de adensamento vertical + radial podem ser descritas pela solução de BARRON (equação (II.28), expressa em termos de grau de adensamento combinado ( $U_{v,h}$ ) e fator tempo combinado ( $T_{v,h}$ ).

O método de LONG E CAREY prevê a determinação da velocidade de recalque em diferentes pontos da curva de recalques ao longo do tempo, obtida a partir de observações reais de campo. A construção de um gráfico  $\log(ds/dt) \times t$  ( $ds/dt$ =velocidade de recalque,  $t$ =tempo) permite que se calcule  $c_{v,h}$  a partir da inclinação  $\text{tg}(\alpha_2)$  da reta obtida, em relação ao eixo dos tempos, através da relação:

$$c_{v,n} = \frac{d_a^2 \cdot F(n)}{0,434 \times 8} \cdot \text{tg}(\alpha_2)$$

O método de ASAOKA modificado por MAGNAN E DEROY se aplica a análises de recalques observados no campo, baseando-se na solução aproximada da equação de Terzaghi (equação II.10, com  $m=0$ ) para drenagem vertical, e na solução de Barron para filtros ideais na condição de deformações iguais (equação II.28) para o caso de drenagem radial. O método consiste em determinar recalques em tempos equiespaçados de  $\Delta t$ , construindo-se um gráfico cujos pontos têm como ordenada a medida de recalque em um determinado tempo ( $S(t)$ ) e como abscissa a medida anterior ( $S(t-\Delta t)$ ). O valor de  $c_v$  ou  $c_n$  é obtido através de uma relação entre estes coeficientes e a inclinação  $\beta_1$  da reta obtida.

Uma análise crítica efetuada por MAGNAN (1983), apresenta as seguintes afirmativas:

Todos os métodos de análise de coeficiente de adensamento apresentados fundamentam-se nos mesmos modelos de cálculo (solução de TERZAGHI, solução de BARRON e teorema de CARRILLO), sendo suas diferenças provenientes dos elementos das curvas de recalque ou dissipação de poro-pressões com os quais eles operam.

Sobre as curvas experimentais tem-se, em geral, uma incerteza acerca dos valores de recalque inicial  $S_0$  e do recalque final  $S_\infty$ . As medidas de excesso de poro-pressões e a definição do grau de adensamento  $U$  correspondente são ge-

ralmente ainda mais sujeitas a erro, sem contar que, principalmente em solos sujeitos a adensamento secundário acentuado, a velocidade de recalques não é igual à velocidade de dissipação do excesso de poro-pressões.

Os métodos de GOULD (1949) e ESCARIO E URIEL (1961) são a princípio os menos confiáveis visto que utilizam os graus de adensamento, avaliados seja a partir das poro-pressões, seja a partir dos recalques, necessitando do conhecimento prévio de  $S_0$  e  $S_\infty$ .

O método de SCOTT (1961) necessita apenas do conhecimento prévio do recalque inicial, fato que o torna melhor que os precedentes.

Os três últimos métodos apresentados, a saber, LONG E CAREY (1978), ELLSTEIN (1971) e ASAKA (1978), são, a princípio, os melhores, visto que utilizam unicamente as medidas de recalques efetuadas ao longo do tempo.

## II.6.2 Determinação do recalque final

A estimativa de recalques por adensamento primário é necessária, por exemplo, quando se deseja determinar o coeficiente de adensamento por um dos métodos que necessitam o conhecimento de  $S_\infty$  (métodos de GOULD (1949) e ESCARIO E URIEL (1961)), ou quando, independente da velocidade de adensamento, deseja-se estimar o recalque final para compará-lo aos valores calculados ou valores provenientes de medidas efetuadas em locais próximos.

MAGNAN (1983) apresenta os métodos de TAN (1971) e ALDRICH E JOHNSON (1972).

O método hiperbólico de TAN (1971) consiste em assimilar a curva de recalque ao longo do tempo a uma hipérbole. O método permite o cálculo do recalque final para solos sujeitos a drenagem vertical e/ou horizontal, admitindo os processos de adensamento primário e secundário ocorrendo simultaneamente. O método de TAN é, segundo MAGNAN, bastante simples e eficaz.

O método de ALDRICH E JOHNSON (1972) baseia-se na representação das deformações relativas  $\Delta H/H$  da camada compressível em função do logaritmo da tensão efetiva média, deduzida do percentual de dissipação de poro-pressões médio da camada. Esse método comporta parâmetros incertos, tais como o valor de  $U$  e das deformações médias.

Os métodos de SCOTT (1961), LONG E CAREY (1978), ELLSTEIN (1971) e ASAOKA (1978) permitem estimar, além do coeficiente de adensamento, o recalque final da camada compressível.

A metodologia convencional para o cálculo do recalque final teórico por adensamento primário, como apresentada por WINTERKORN E FANG (1975), se presta à comparação de seus resultados com os obtidos pelos demais métodos para o cálculo de recalque final.

A aplicação desse método prevê o conhecimento de parâmetros obtidos em ensaios oedométricos, tais como, tensão de so-

breadensamento, índice de compressão virgem, índice de recompressão, além do índice de vazios inicial da amostra, altura inicial da camada (ou subcamada) e acréscimo de tensão vertical aplicado.

### II.6.3 Comentários finais

O método de LONG E CAREY (1978) permite que se calcule um coeficiente de adensamento combinado (horizontal+vertical), não se prestando à análise de coeficientes de adensamento em trechos desprovidos de elementos verticais de drenagem (drenos verticais).

O método de ELLSTEIN (1971) limita-se ao cálculo do coeficiente de adensamento vertical, não se prestando à análise de trechos providos de elementos verticais drenantes.

O método de TAN (1971), embora simples e eficaz, limita-se à determinação do recalque final.

O método de ASAOKA (1978), modificado por MAGNAN E DEROY, apresenta-se como um método que combina versatilidade, simplicidade e confiabilidade, de acordo com TERRA (1988), sendo o mesmo utilizado neste trabalho para a análise dos recalques medidos em placas do aterro Experimental II do Sarapuí. Esse método encontra-se descrito detalhadamente no capítulo III desta tese.

Os métodos de LONG E CAREY (1978), ELLSTEIN (1971), TAN (1971) e ASAOKA (1978) foram analisados por TERRA (1988),

que realizou um estudo comparativo dos mesmos na análise dos recalques medidos nas placas de recalque centrais de cada uma das seções instrumentadas do Aterro Experimental II do Sarapuí.

Nessa análise, TERRA (1988) considerou, nas seções providas de drenos verticais, a hipótese de que a contribuição da drenagem vertical seria desprezível em relação à drenagem radial (horizontal), tanto para o método de ASAOKA (1978) como para o método de LONG E CAREY (1978). Essa hipótese é, no entanto, bastante questionável, porquanto introduz erros na análise, não sendo portanto adotada neste trabalho.



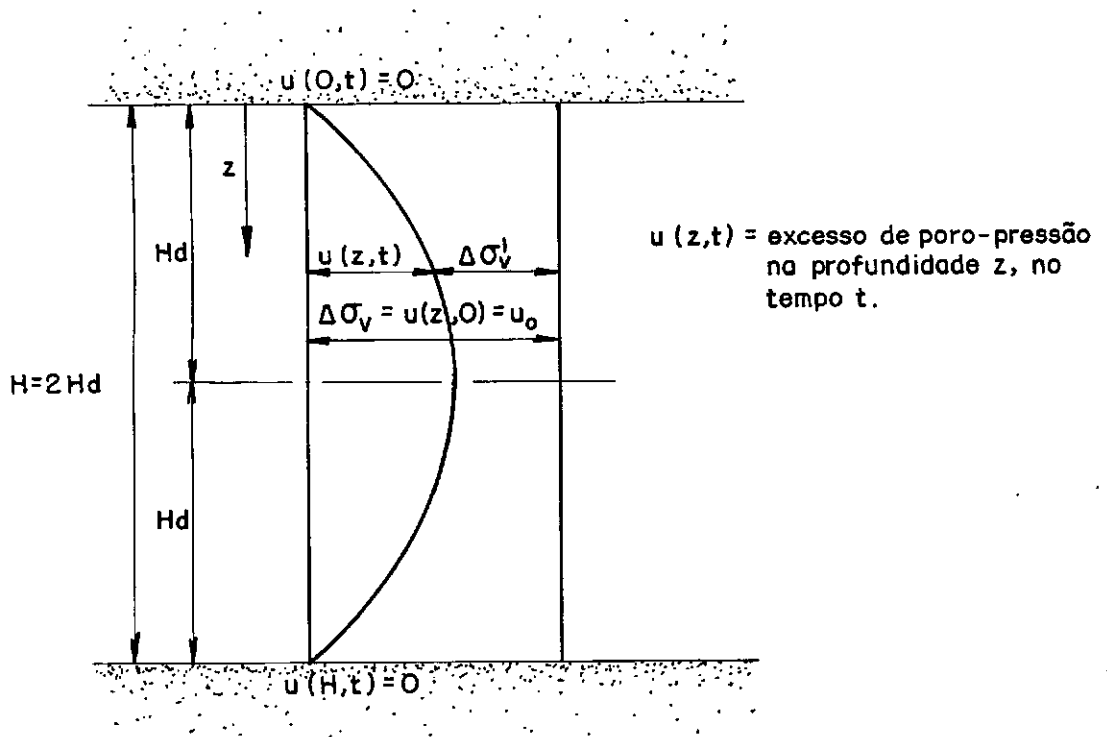
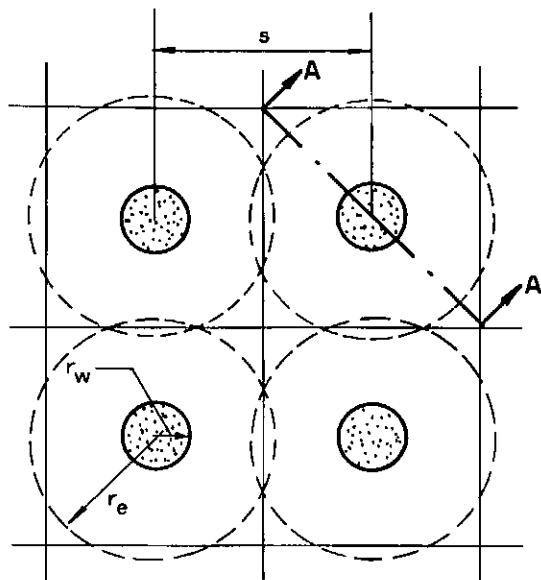
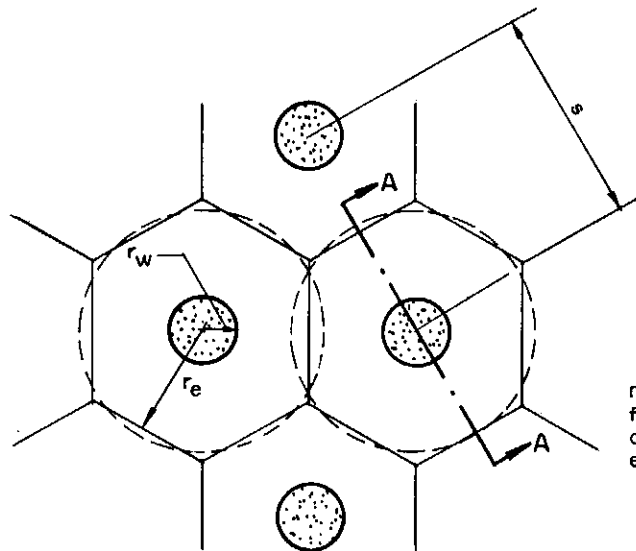


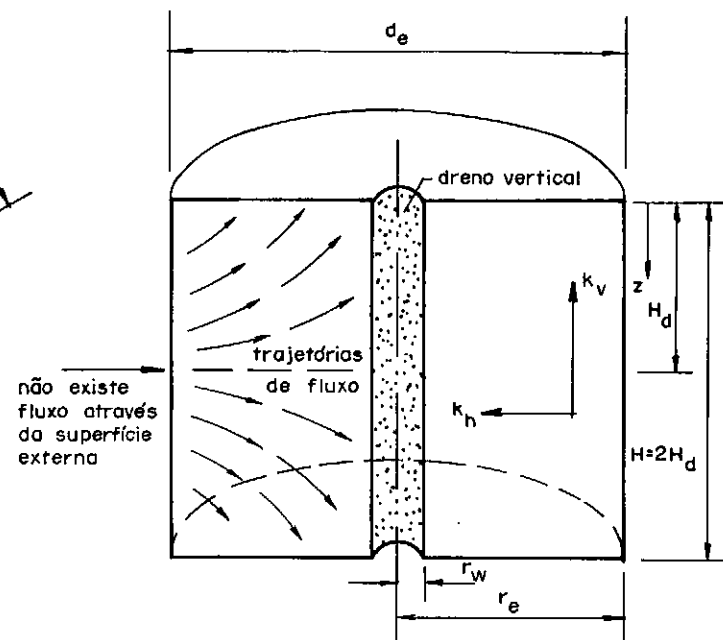
Figura II.1 - Condições de contorno do problema de adensamento unidimensional com drenagem dupla e incremento de tensão  $\Delta\sigma_v$  constante.



(a) Malha Quadrangular.



(b) Malha Triangular.



(c) SEÇÃO AA - Fluxo no interior da zona de influência de cada dreno.

Figura II.2 - Representação esquemática de drenos verticais. (Apud TERRA, 1988)

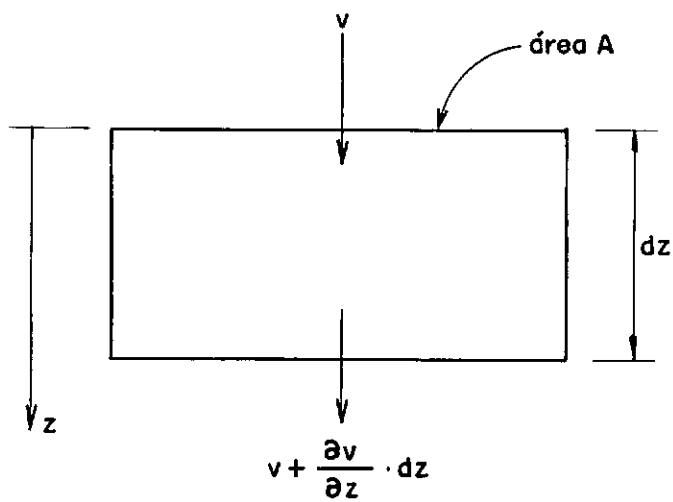


Figura II.3 - Elemento de solo sob adensamento unidimensional.

## CAPÍTULO III

### Método de Asaoka Para Interpretação de Medidas de Recalque

#### III.1 Introdução

O MÉTODO DE ASAOKA, proposto inicialmente por ASAOKA (1978) e posteriormente modificado por MAGNAN E DEROY (1980), permite que se estimem, através de uma análise gráfica simples, os coeficientes de adensamento horizontal e vertical, bem como o recalque final de uma camada de solo homogênea, a partir da interpretação de medidas de recalque no campo obtidas durante um certo período de tempo.

O MÉTODO DE ASAOKA adota como equação fundamental a equação do adensamento proposta por MIKASA (1963), que é expressa em termos da deformação específica  $\epsilon_v$  e assume que a permeabilidade,  $k$ , e o coeficiente de compressibilidade volumétrica,  $m_v$ , variam proporcionalmente durante o processo de adensamento.

#### III.2 Desenvolvimento Teórico

ASAOKA (1978) adota a equação do adensamento de Mikasa (equação II.41) em lugar da equação do adensamento de Terzaghi pelo fato de que a 1ª é válida mesmo no caso de variação da permeabilidade e do coeficiente de compressibilidade volumétrica durante o processo de adensamento, desde que o coeficiente de adensamento permaneça constante. Além disso, a equação de Mikasa facilita o desenvolvimento do

método expresso em termos de recalques.

Com base nos trabalhos de ASAOKA (1978) e MAGNAN E DEROY (1980), pode-se dizer que a equação diferencial parcial do adensamento expressa em termos da deformação volumétrica específica,  $\epsilon_v$ , como derivada por MIKASA (equação II.41), é equivalente a uma equação diferencial ordinária sob a forma de série:

$$S(t) + a_1 \frac{dS(t)}{dt} + a_2 \frac{d^2S(t)}{dt^2} + \dots + a_n \frac{d^n S(t)}{dt^n} + \dots = b \quad (\text{III.1})$$

onde  $S(t)$  representa o recalque por adensamento em um tempo  $t$  e  $a_1, a_2, \dots, a_n$  e  $b$  são coeficientes constantes que dependem do coeficiente de adensamento e das condições de contorno da camada de solo, supostos constantes ao longo do processo de adensamento (MAGNAN E MIEUSSENS, 1980).

De acordo com ASAOKA (1978) a equação (III.1), equivalente à equação (II.41), se apresenta para o caso de drenagem dupla, para as condições de contorno:

$$\epsilon_v(t, z=0) = \bar{\epsilon}_v = \text{constante},$$

$$\epsilon_v(t, z=H) = \underline{\epsilon}_v = \text{constante, como:}$$

$$S(t) + \frac{1}{3!} \frac{H^2}{c_v} \frac{dS(t)}{dt} + \frac{1}{5!} \frac{H^4}{c_v^2} \frac{d^2S(t)}{dt^2} + \dots = \frac{H}{2} \cdot (\bar{\epsilon}_v + \underline{\epsilon}_v) \quad (\text{III.2})$$

Para o caso de drenagem simples (superior), para as condições de contorno:

$$\epsilon_v(t, z=0) = \bar{\epsilon}_v = \text{constante},$$

$$\partial \epsilon_v / \partial z(t, z=H) = 0, \text{ tem-se segundo ASAOKA:}$$

$$S(t) + \frac{1}{2!} \frac{H^2}{c_v} \frac{dS(t)}{dt} + \frac{1}{4!} \frac{H^4}{c_v^2} \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + \dots = H \cdot \bar{\epsilon}_v \quad (\text{III.3})$$

onde

$\epsilon_v$  é a deformação volumétrica específica

$z$  é a profundidade tomada a partir do topo da camada

$S(t)$  é o recalque por adensamento em um tempo  $t$ ;

$H$  é a espessura da camada compressível;

$\bar{\epsilon}_v$  é a deformação volumétrica específica no topo da camada

$\underline{\epsilon}_v$  é a deformação volumétrica específica na base da camada

Segundo MAGNAN E MIEUSSENS (1980), para o caso clássico de adensamento unidimensional de uma camada de solo homogêneo com drenagem simples, a equação (III.1) toma a forma:

$$S(t) + \frac{5}{12} \cdot \frac{H_d^2}{c_v} \cdot \frac{dS(t)}{dt} + \dots = H \cdot \epsilon_{vr} \quad (\text{III.4})$$

onde  $\epsilon_{vr}$  é a deformação específica vertical final no topo da camada ( $z=0$ ), e  $H_d$  é a altura de drenagem, igual à espessura,  $H$ , da camada.

Para o caso de drenagem dupla utiliza-se na equação (III.4) a altura de drenagem  $H_d$  igual a  $H/2$ .

Cabe observar que os autores acima citados não demonstram de que forma chegaram à sua solução, não esclarecendo o porquê da diferença entre esta e a de ASAKA (1978).

Pode-se notar que os termos de ordem superior da equação (III.1) são muito pequenos, o que justifica uma aproximação de ordem  $n$ , podendo ser adotada a seguinte equação fundamental para a relação recalque-tempo:

$$S(t) + a_1 \frac{dS(t)}{dt} + a_2 \frac{d^2S(t)}{dt^2} + \dots + \frac{d^n S(t)}{dt^n} - a_n = b \quad (\text{III.5})$$

Se discretizarmos  $S(t)$  em termos do tempo  $t$ , como se segue (ver figura III.1):

$$\begin{cases} t_j = j \cdot \Delta t, \quad j = 0, 1, 2, \dots, \quad \Delta t = \text{interv. de tempo} = \text{constante} \\ S_j = S(t_j) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

a equação (III.5) pode ser escrita sob a forma da relação de recorrência de ordem  $n$ :

$$S_j = \beta_0 + \sum_{s=1}^n \beta_s \cdot S_{j-s} \quad (\text{III.7})$$

Fazendo-se uma aproximação de 1ª ordem, o que, segundo BALASUBRAMANIAM & BRENNER (1981), é normalmente satisfatório para a maioria dos casos práticos, as equações (III.5) e (III.7) reduzem-se respectivamente a:

$$S(t) + a_1 \frac{dS(t)}{dt} = b \quad (\text{III.8})$$

e

$$S_j = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{j-1} \quad (\text{III.9})$$

Sob condições de contorno estacionárias, a solução de (III.8) é:

$$S(t) = S_{\infty} - (S_{\infty} - S_0) \cdot \exp(-t/a_1) \quad (\text{III.10})$$

onde  $S_0$  e  $S_{\infty}$  são, respectivamente, os recalques inicial e final da camada compressível e  $S_{\infty}$  é o coeficiente  $b$  da equação (III.8).

Após algumas transformações algébricas na equação (III.9) tem-se:

$$S_j = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} - \left[ \frac{\beta_0}{1-\beta_1} - S_0 \right] \cdot (\beta_1)^j \quad (\text{III.11})$$



Para a condição de contorno  $t=\infty$ , tem-se que  $S_j = S_{j-1} = S_\infty$ , o que, substituído em (III.9), conduz a:

$$S_\infty = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} \quad (\text{III.12})$$

Substituindo-se (III.12) em (III.11) obtém-se:

$$S_j = S_\infty - (S_\infty - S_0) \cdot (\beta_1)^j \quad (\text{III.13})$$

Comparando-se as equações (III.10) e (III.13), utilizando-se (III.6), conclui-se que:

$$\ln(\beta_1) = \frac{-\Delta t}{a_1} \quad (\text{III.14})$$

MASSAD (1982) chega de uma outra maneira à expressão de  $\ln(\beta_1)$ , ao mostrar que a aplicabilidade do método se dá para qualquer problema físico em que a função matemática exata ou simplificada seja do tipo:

$$y = a + b \cdot \exp(cx)$$

A equação (III.10) para o k-ésimo valor de  $S(t)$  pode ser escrita em função de  $t$  sob a forma:

$$S_k = a + b \cdot \exp(ct) \quad (\text{III.15})$$

sendo:

$$a = S_{\infty}$$

$$b = -(S_{\infty} - S_0)$$

$$c = -1/a_1$$

$$t = k. \Delta t$$

Substituindo-se os valores de  $c$  e  $t$  na expressão (III.15), tem-se:

$$S_j = a + b \cdot \exp\left(\frac{-k \cdot \Delta t}{a_1}\right) \quad (\text{III.16})$$

Pode-se então lançar em um gráfico  $S_j$  em função de  $S_{j-1}$ , função esta traduzida pela equação (III.9), que é a equação de uma reta cujo coeficiente angular é  $\beta_1$ . Utilizando-se a expressão (III.16) para os pontos genéricos  $(S_{k-2}, S_{k-1})$  e  $(S_{k-1}, S_k)$ , pode-se determinar a tangente à reta  $S_j = f(S_{j-1})$ , ou seja, o coeficiente angular,  $\beta_1$ , da reta, como se segue (ver figura (III.2)):

$$\beta_1 = \frac{S_k - S_{k-1}}{S_{k-1} - S_{k-2}}$$

$$\beta_1 = \frac{\{a+b \cdot \exp[-k \cdot \Delta t/a_1]\} - \{a+b \cdot \exp[-(k-1) \cdot \Delta t/a_1]\}}{\{[a+b \cdot \exp[-(k-1) \cdot \Delta t/a_1]\} - \{a+b \cdot \exp[-(k-2) \cdot \Delta t/a_1]\}}$$

$$\beta_1 = \exp[-\Delta t/a_1] \quad . . \quad \ln(\beta_1) = -\Delta t/a_1 \quad \text{c.q.d.}$$

As equações (III.2) e (III.3) de ASAOKA, eliminando-se os termos de ordem superior e substituindo-se  $H$  ( $H$ =espessura da camada) por  $2H_a$  ou  $H_a$  ( $H_a$ =altura de drenagem), respecti-

vamente para drenagem dupla e simples, tomam a forma:

$$S(t) + \frac{2}{3} \cdot \frac{H_d^2}{c_v} \cdot \frac{dS(t)}{dt} = S_{\infty} \quad (\text{III.17})$$

onde  $H_d = H/2$ ; e

$$S(t) + \frac{1}{2} \cdot \frac{H_d^2}{c_v} \cdot \frac{dS(t)}{dt} = S_{\infty} \quad (\text{III.18})$$

onde  $H_d = H$

A equação (III.4) de MAGNAN E MIEUSSENS toma a forma:

$$S(t) + \frac{5}{12} \cdot \frac{H_d^2}{c_v} \cdot \frac{dS(t)}{dt} = S_{\infty} \quad (\text{III.19})$$

onde  $H_d = H/2$  no caso de drenagem dupla e  $H_d = H$  no caso de drenagem simples.

Assim, as expressões de  $a_1$  propostas por ASAOKA para o caso de drenagem vertical são:

$$a_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{H_d^2}{c_v} \quad (\text{III.20})$$

$$a_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{H_d^2}{c_v} \quad (\text{III.21})$$

respectivamente para drenagem dupla (topo e base) e para

drenagem simples (topo).

A expressão de  $a_1$  proposta por MAGNAN E MIEUSSENS (1980) para drenagem dupla ou simples é:

$$a_1 = \frac{5}{12} \cdot \frac{H_d^2}{c_v} \quad (\text{III.22})$$

MAGNAN E DEROY (1980) modificaram o Método de Asaoka baseando-se na teoria de Terzaghi e Frolich para a determinação de  $a_1$  no caso de drenagem vertical, e estenderam o método para o caso de drenagem radial, baseando-se na solução de BARRON (1948) para a determinação de  $a_1$ .

Partindo-se da solução da equação de Terzaghi (equação(II.10)) e utilizando-se apenas o 1º termo da série ( $m=0$ ) como se segue,

$$U_v = \frac{S(t)}{S_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp \left[ -\frac{\pi^2}{4} \cdot T_v \right] \quad (\text{III.23})$$

resulta que:

$$S(t) = S_\infty \cdot \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp \left( -\frac{\pi^2}{4} \cdot T_v \right) \right] \quad (\text{III.24})$$

ou

$$S(t) = S_\infty \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp \left( -\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \right) \right] \quad (\text{III.25})$$

Tem-se que a função  $S(t)$  é uma solução da equação diferencial,

$$S(t) + \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{H_d^2}{c_v} \cdot \frac{dS(t)}{dt} = S_{\infty} \quad (\text{III.26})$$

logo:

$$a_1 = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{H_d^2}{c_v} \quad (\text{III.27})$$

que é ligeiramente diferente do valor indicado por MAGNAN E MIEUSSENS (1980).

Segundo MASSAD (1982), o fato de Asaoka ter fundamentado seu método sobre a teoria de Mikasa e não sobre a de Terzaghi não é de grande importância, visto que a equação diferencial que governa o desenvolvimento dos recalques é a mesma em ambas as teorias.

Para o caso de drenagem radial em torno de um dreno, a análise se baseia na solução de BARRON (1948). Neste caso, a solução exata, na ausência de drenagem vertical, é dada pela equação (II.28), a partir da qual tem-se:

$$S(t) = S_{\infty} \left[ 1 - \exp \left( \frac{-8}{F(n)} \cdot T_h \right) \right] \quad (\text{III.28})$$

ou

$$S(t) = S_{\infty} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{8 \cdot c_h \cdot t}{F(n) \cdot d_e^2} \right) \right] \quad (\text{III.29})$$

sendo a função  $S(t)$ , solução da equação diferencial:

$$S(t) + \frac{d_e^2 \cdot F(n)}{8c_h} \cdot \frac{dS(t)}{dt} = S_{\infty} \quad (\text{III.30})$$

Então:

$$a_1 = \frac{d_e^2 \cdot F(n)}{8c_h} \quad (\text{III.31})$$

Para o caso de um solo sujeito à drenagem vertical e radial simultaneamente, MAGNAN E DEROY (1980) utilizam-se da equação de CARRILLO (equação (II.17)) em conjunto com as soluções das equações de TERZAGHI reduzida para a 1ª ordem (equação (III.24)) e BARRON (equação (II.28)), para a determinação de  $a_1$ .

Desta forma chega-se a:

$$U_{v,h} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp \left[ -\frac{8c_h \cdot t}{d_e^2 \cdot F(n)} + \frac{-\pi^2}{4} \cdot \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \right] \quad (\text{III.32})$$

Sendo:

$$S(t) = S_{\infty} \cdot \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left[ -\left( \frac{8c_h \cdot t}{d_e^2 \cdot F(n)} + \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \right) \right] \right\} \quad (\text{III.33})$$

E assim,

$$a_1 = \frac{-\Delta t}{\ln(\beta_1)} = \frac{1}{\frac{8c_h}{d_o^2 \cdot F(n)} + \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{c_v}{H_d^2}} \quad (\text{III.34})$$

Observa-se então que estamos diante de um sistema indeterminado, com duas incógnitas,  $c_v$  e  $c_h$ , e apenas uma equação. É, portanto, difícil de se decidir quais os valores respectivos de  $c_v$  e  $c_h$ , em função do valor de  $a_1$ , tornando-se necessária uma informação adicional, qual seja a relação entre os coeficientes de adensamento vertical e radial (horizontal), para o solo em questão.

Para a formulação apresentada é interessante observar que o resultado no caso de adensamento vertical devido a fluxo combinado (horizontal + vertical), é equivalente ao caso de adensamento devido puramente a fluxo vertical, para um valor diferente do coeficiente de adensamento vertical, o mesmo se podendo afirmar em relação ao coeficiente de adensamento horizontal, na hipótese de se considerar apenas fluxo horizontal.

### III.3 A Construção Gráfica de Asaoka

Este procedimento gráfico é uma forma de resolução da relação de recorrência apresentada pela equação (III.9). Para tanto, deve-se proceder ao traçado da curva Recalque x Tempo traçada a partir das medidas de recalque no campo

(figura III.1), procedendo-se em seguida à construção de um gráfico, com idênticas escalas horizontal e vertical, de abscissas  $S_{j-1}$  e ordenadas  $S_j$  (figura III.2), cujos pontos são correspondentes às observações obtidas da curva Recalque x Tempo feitas para  $(t_j)_{j=1,2,\dots} = (j \cdot \Delta t)_{j=1,2,\dots}$ .

A inclinação  $\beta_1$  da reta que melhor se ajusta a esses pontos permite que se calcule o valor de  $a_1$  (equação III.14) e a partir deste, os coeficientes de adensamento. O ponto de interseção desta reta com a bissetriz dos eixos cartesianos define o recalque a tempo infinito ( $S_\infty = S_j = S_{j-1}$ ).

Pode-se ainda, de posse do valor da ordenada  $\beta_0$ , correspondente a  $S(t=0)$ , e da inclinação  $\beta_1$ , estimar o valor do recalque  $S_\infty$ , pela expressão (III.12).

Os passos necessários à obtenção dos resultados são apresentados a seguir:

(a) Traçado da curva Recalque x Tempo plotada em escala aritmética, a partir das medidas de campo.

(b) Divisão da curva traçada em (a) a intervalos  $\Delta t$  constantes.

(c) Determinação dos recalques  $S_1, S_2, \dots$  correspondentes aos tempos  $t_1, t_2, \dots$ .

(d) Plotagem dos pontos  $(S_{j-1}, S_j)$ , obtidos com os valores



determinados em (c), em um sistema de eixos cartesianos com a mesma escala para o eixo das ordenadas e das abscissas.

(e) Traçado da reta que melhor se ajuste aos pontos do gráfico do item (d).

(f) Traçado da bissetriz dos eixos cartesianos.

(g) Determinação da inclinação  $\beta_1$  da reta do item (e).

(h) Determinação do recalque final através da leitura das coordenadas do ponto de interseção da reta de (e) com a bissetriz dos eixos cartesianos (nesse ponto tem-se  $S_j = S_{j-1} = S_\infty$ ). Alternativamente, o recalque final pode ser obtido pela expressão (III.12), após a determinação anterior da ordenada  $\beta_0$  do ponto de interseção da reta obtida em (e) com o eixo vertical.

(i) Cálculo dos coeficientes de adensamento vertical e/ou horizontal a partir de  $a_1$  (obtido em função de  $\beta_1$  através da equação (III.14)), através das fórmulas adequadas. Nesta tese serão adotadas as expressões de MAGNAN E DEROY (1980).

#### III.4 Tipos de Construções de Asaoka

De acordo com MAGNAN E DEROY (1980) existem quatro tipos de construções de Asaoka, a saber:

(a) Em certos casos (figura III.3 (a)) ocorre que os pontos do gráfico  $S_{j-1} \times S_j$  se apresentam mais bem ajustados por

duas retas (A) e (B). Nesta situação, a reta (B) correspondente a uma mudança de inclinação da reta (A), representa a fase onde ocorrem apenas recalques por compressão secundária após a fase inicial de adensamento representada pela reta (A), em concordância com a teoria de Terzaghi, que assume que o adensamento secundário tem início após o término do adensamento primário ou dissipação do excesso de poro-pressões.

(b) Nos casos de aplicação de carga por etapas (figura III.3 (b)), pode-se ajustar duas ou mais retas "paralelas", cada qual correspondente a uma etapa de carregamento, podendo ser feita a análise em separado para cada uma das etapas de carregamento. Na realidade, a inclinação varia um pouco, devendo aumentar quando se passa da reta (A) para a reta (B), visto que é esperada uma diminuição do coeficiente  $c_v$  com a dissipação das poro pressões, sendo que quanto maior é o valor de  $c_v$  menor é o valor de  $\beta_1$ .

(c) Pode-se encontrar, também, os casos (figura III.3 (c)) onde se faça o ajuste por duas ou mais retas "paralelas" (retas A, B e C) e por uma reta final secante (D) correspondente aos recalques por compressão secundária apenas, manifestando-se somente para o carregamento final.

(d) Se o tempo entre os incrementos de carga for suficientemente longo, tem-se os casos mais complexos (figura III.3 (d)), onde uma reta para a compressão secundária pode ser também ajustada para cada etapa de carregamento.

### III.5 Considerações e Observações Finais

(a) O intervalo de tempo  $\Delta t$  deve ser em geral escolhido entre 30 e 100 dias (MAGNAN E DEROY, 1980).

(b) Segundo ASAOKA (1978) e MAGNAN E MIEUSSENS (1980), quanto maior é o intervalo de tempo  $\Delta t$ , maior é a precisão das estimativas. Entretanto, esta influência do valor de  $t$ , de acordo com MASSAD (1982) e TERRA (1988) não é muito significativa para os resultados finais obtidos, desde que atendido o critério estabelecido em (a).

(c) Quando o número de pontos for muito pequeno, em virtude de um  $\Delta t$  elevado, ASAOKA sugere um rearranjo dos pontos da seguinte maneira:

1)	$S(t=0)$ ,	$S(t=\Delta t)$	,	$S(t=2\Delta t)$	,	...
2)	$S(t=1)$ ,	$S(t=1+\Delta t)$ ,		$S(t=1+2\Delta t)$	,	...
	.	.		.		
	.	.		.		
10)	$S(t=10)$ ,	$S(t=10+\Delta t)$ ,		$S(t=10+2\Delta t)$ ,		...
	.	.		.		
	.	.		.		

onde  $\Delta t$  é o intervalo de tempo adotado e  $t$  o tempo contado a partir da aplicação do carregamento, em dias, semanas, meses,...

Sendo  $\beta_0$  e  $\beta_1$  independentes de um tempo absoluto, todas as séries de pontos podem ser plotadas em um mesmo gráfico para se obter a reta de Asaoka (ASAOKA, 1978).

(d) Quanto maior é a inclinação  $\beta_1$  da reta de Asaoka, menor é o valor do coeficiente de adensamento, para um mesmo  $\Delta t$ .

(e) Quanto maior é o valor de  $\Delta t$  utilizado, menor é o valor da inclinação,  $\beta_1$ , da reta de Asaoka, para uma mesma massa de solo analisada, já que para que o valor de  $c_v$  se mantenha, aumentando-se  $\Delta t$ ,  $\beta_1$  deve diminuir.

(f) A construção gráfica de Asaoka é aplicável apenas à análise do comportamento de uma camada única ou, mais exatamente, a uma massa de solo que não apresente diversos níveis drenantes intermediários. Se estes horizontes drenantes existem, é necessário que se faça a análise em separado dos recalques das camadas limitadas pelos mesmos (MAGNAN E DEROY, 1980).

(g) Segundo MAGNAN E MIEUSSENS (1980), a construção gráfica de Asaoka permite boas estimativas, desde que  $\Delta t$  seja suficientemente grande e que se alcance ao menos 60% do recalque final durante as observações.

(h) Para valores de  $T_v$  maiores que 0,05, há concordância entre as curvas correspondentes à solução de Terzaghi,  $U_v = S(t)/S_\infty = f(T_v)$ , à função aproximada utilizada por MAGNAN E DEROY (equação (III.23)), e à função aproximada de MAGNAN E MIEUSSENS (1980),  $U_v = 1 - (8/\pi^2) \cdot \exp[(-12/5) \cdot T_v]$ . Isto é mostrado na figura (III.4), resultado de comparação feita por MAGNAN E DEROY (1980).

(i) As expressões de MAGNAN E DEROY (III.27, III.31 e III.33) adotadas para  $a_1$  foram utilizadas com resultados satisfatórios para cálculo de coeficientes de adensamento em trabalhos realizados no "Laboratoire Central de Ponts e

Chaussées" (Paris) e por MASSAD (1982), sendo utilizadas nas análises efetuadas no presente trabalho.

(j) Se forem constatadas grandes divergências entre os valores dos coeficientes de adensamento calculados pelo método de Asaoka e os valores determinados através de reconhecimento geotécnico do local, estas divergências podem advir, dentre outros, de erros na apreciação das distâncias de drenagem, principalmente nos casos de drenos verticais (MAGNAN E DEROY, 1980).

(k) Para a previsão de recalques incluindo o adensamento secundário, ASAOKA (1978) sugere, com base no modelo de Voigt para o adensamento secundário, uma equação de segunda ordem do tipo:

$$S_j = \beta_0 + \sum_{s=1}^2 \beta_s \cdot S_{j-s}$$

### III.6 Extensão Proposta Para o Método de Asaoka Modificado

Propõe-se aqui uma extensão do Método de Asaoka Modificado, para o cálculo de recalques em qualquer tempo  $t$  ( $S(t)$ ).

Substituindo-se nas equações (III.25) e (III.33), os valores de  $a_1 = -\Delta t / \ln(\beta_1)$  dados pelas expressões (III.27) e (III.34), respectivamente para drenagem vertical e combinada, chega-se à seguinte expressão para o valor de  $S(t)$ :

$$S(t) = S_{\infty} \cdot \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\ln(\beta_1)}{\Delta t} \cdot t\right) \right] \quad (\text{III.35})$$

Substituindo-se o valor de  $S_{\infty}$  por aquele dado pela expressão (III.12), tem-se:

$$S(t) = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} \cdot \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\ln(\beta_1)}{\Delta t} \cdot t\right) \right] \quad (\text{III.36})$$

Esta expressão é válida, para carregamento aplicado em etapa única, para drenagem vertical e combinada, e independe do cálculo de  $c_v$ ,  $c_h$  ou  $S_{\infty}$ , sendo função apenas dos parâmetros obtidos da reta de Asaoka.

Analogamente para drenagem puramente radial, aplicando-se em (III.29) o valor de  $a_1$  dado por (III.31), tem-se:

$$S(t) = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\ln(\beta_1)}{\Delta t} \cdot t\right) \right] \quad (\text{III.37})$$

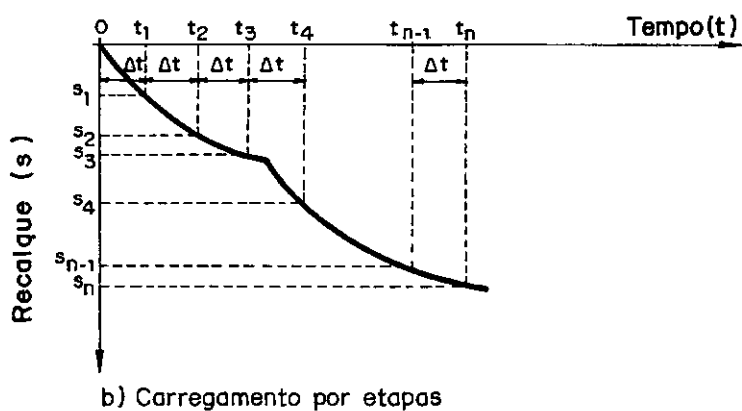
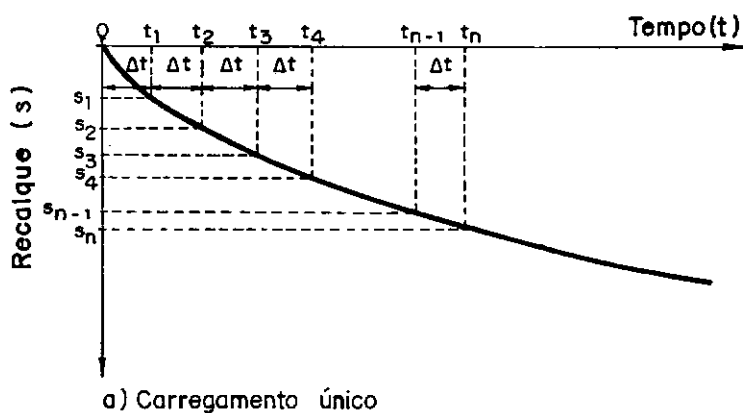


Figura III.1 - Curvas de recalques medidos ao longo do tempo.

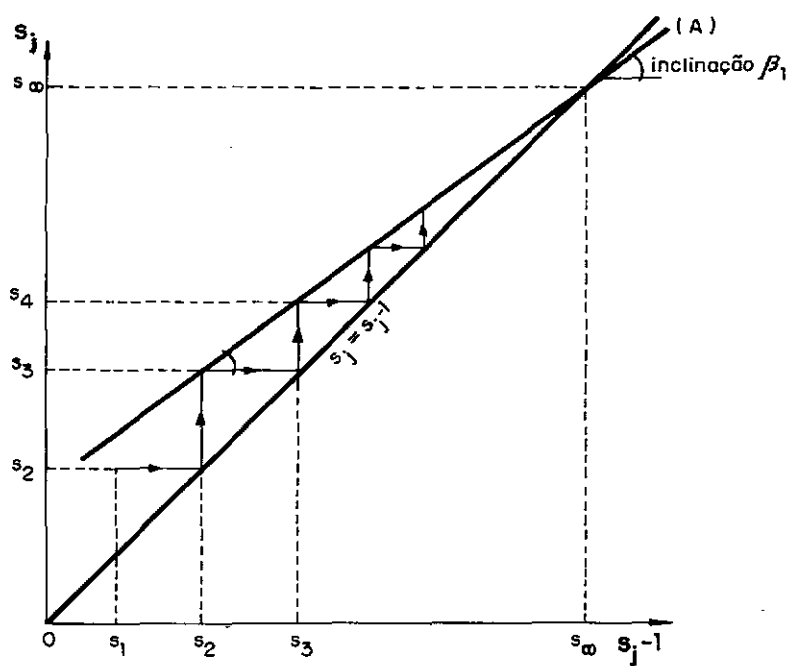
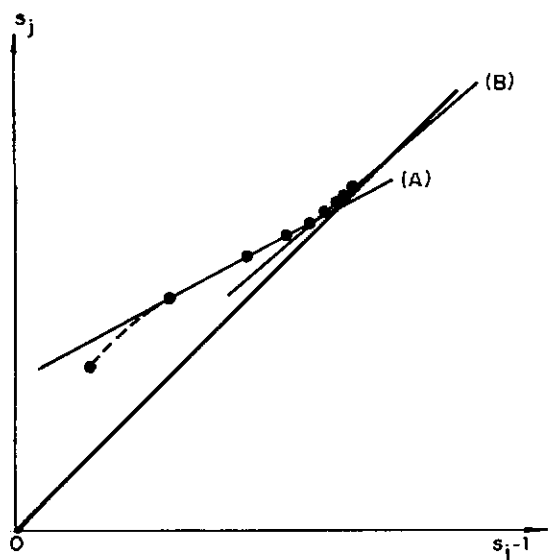
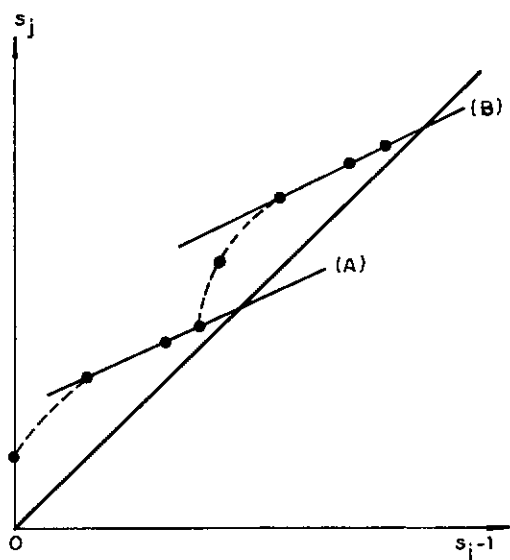


Figura III.2 - Construção gráfica de Asaoka.

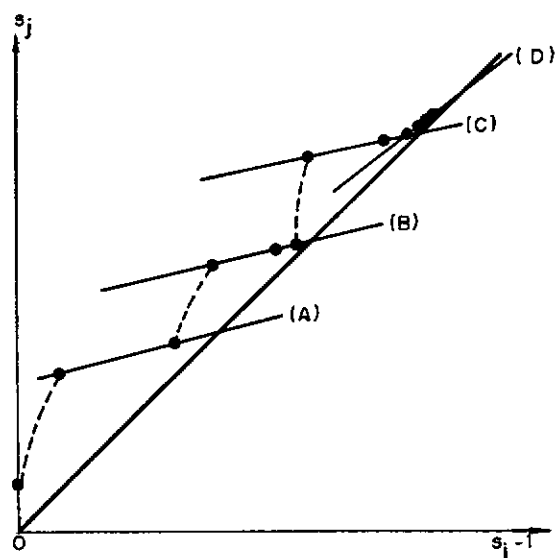




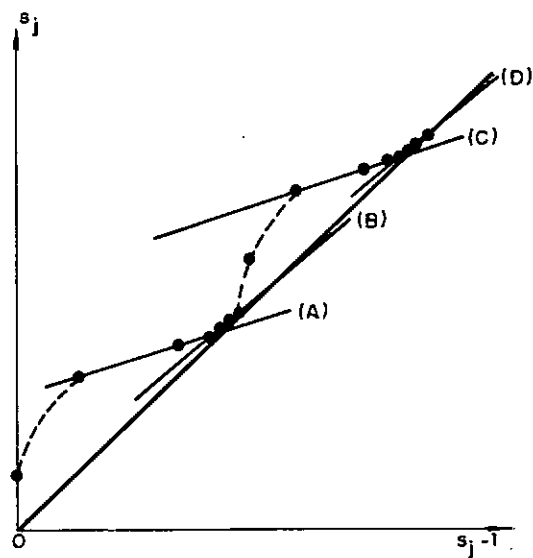
a) Construção de Asaoka em caso de compressão secundária.



b) Construção de Asaoka em caso de carregamento por etapas.



c) Construção de Asaoka em caso de carregamento por etapas com compressão secundária ao final.



d) Construção de Asaoka em caso de carregamento por etapas com compressão secundária a cada etapa.

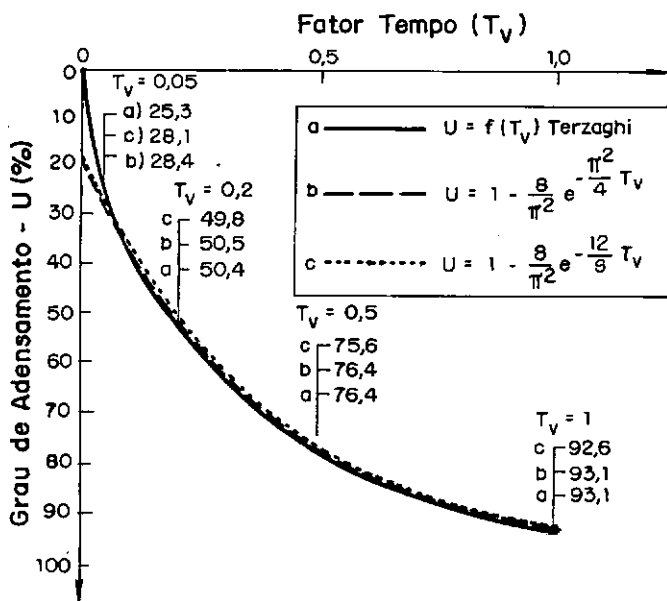


Figura III.4 - Comparação entre a solução de Terzaghi e suas duas aproximações. (Apud MAGNAN e DERROY, 1980)

## CAPÍTULO IV

### Descrição do Aterro Experimental II

#### IV.1 Introdução

A construção do Aterro Experimental II na Area Experimental do Sarapuí, localizada na rodovia BR-040, a cerca de 8,0 km da cidade do Rio de Janeiro, às margens do Rio Sarapuí na Baixada Fluminense, sobre o depósito de argila mole ali existente, faz parte de um projeto de pesquisa financiado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (IPR-DNER).

Essa pesquisa, realizada em trabalho conjunto com a Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ) e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), constou ainda de um aterro experimental levado à ruptura (Aterro Experimental I) e uma escavação.

O local foi escolhido devido à existência de uma camada contínua de sedimento argiloso de alta compressibilidade e baixa resistência, solo que por suas características requer, por ocasião da construção de rodovias, a adoção de cuidados especiais como processos de estabilização, muitas vezes associados a medidas para aceleração de recalques.

O Aterro Experimental II contou, na fase de anteprojeto, com a colaboração e sugestões de cerca de oitenta técnicos

brasileiros, entre representantes de firmas projetistas e executoras de drenos, consultores e pesquisadores, que participaram do seminário promovido pelo IPR em fevereiro de 1979, sendo que o aterro veio a ter sua construção iniciada em novembro de 1980.

Neste capítulo serão apresentados os aspectos técnicos considerados na elaboração do anteprojeto, a localização e geometria do aterro, a geometria e os tipos de elementos drenantes utilizados, uma descrição sumária da instrumentação e informações sobre o depósito de argila mole denominada "argila cinza do Rio de Janeiro", "argila do Sarapuí" ou "argila mole da Baixada Fluminense".

As informações contidas neste capítulo foram obtidas em sua maior parte dos trabalhos de ORTIGAO (1980), COLLET (1985) e TERRA (1988).

#### **IV.2 Aspectos Técnicos Considerados na Elaboração do Anteprojeto**

Segundo COLLET (1985), os principais aspectos que envolveram a formulação do anteprojeto, e que nortearam a execução do projeto, foram:

(a) Estudo do adensamento de um aterro construído com geometria a mais aproximada possível da utilizada para implantação de rodovias, dividido em seções sobrejacentes a drenos verticais aceleradores de recalques, executados com variadas técnicas construtivas;

- (b) Inclusão nesse aterro de trecho ou trechos desprovidos de elementos verticais drenantes, com a finalidade de proceder-se a estudos comparativos de recalques;
- (c) Construção do aterro em parte da "Área Experimental do Sarapuí" apresentando a menor variação de espessura do depósito de argila mole ao longo do eixo, detectada através de sondagens efetuadas no local;
- (d) Geometria do aterro fixada levando-se em consideração, para as dimensões de base e topo, a possibilidade de novas etapas construtivas e, para a altura, um fator de segurança razoável, tendo em vista a altura crítica determinada quando da execução do Aterro Experimental I;
- (e) Escolha de alguns tipos de drenos de areia e pré-fabricados, dentre os mais usualmente empregados no Brasil, compatibilizando-se, obviamente, a quantidade de drenos com um volume de aterro economicamente razoável;
- (f) Adoção de um colchão de areia, como primeira camada de aterro, conforme recurso largamente adotado para drenagem e suporte de equipamentos;
- (g) Dimensionamento da malha drenante levando-se em consideração: (1) a teoria de adensamento para projetos de drenos verticais desenvolvida por BARRON (1948); (2) parâmetros de adensamento obtidos em laboratório; (3) diâmetro de drenos usualmente empregados no Brasil; (4) mesma eficiência nominal no adensamento para todos os tipos de dre-

nos executados, ou seja, mesmas porcentagens teóricas de adensamento nos mesmos intervalos de tempo; (5) acompanhamento do processo de adensamento através de instrumentação adequada, de acordo com os objetivos da pesquisa.

#### IV.3 Localização e Geometria do Aterro

A localização definitiva da área destinada ao Aterro Experimental II, dentro da planta de situação da "Área Experimental do Sarapuí" encontra-se apresentada na figura IV.1.

O aterro foi dividido em sete seções distribuídas no sentido longitudinal da faixa conforme mostrado no quadro apresentado a seguir e graficamente esclarecido na figura IV.1.

SEÇÃO	COMPRIMENTO	DISCRIMINAÇÃO
A	60 m	sem drenos - colchão drenante de geotêxtil
B	45 m	com drenos - colchão dren. areia
C	35 m	com drenos - colchão dren. areia
D	35 m	com drenos - colchão dren. areia
E	35 m	com drenos - colchão dren. areia
F	45 m	com drenos - colchão dren. areia
G	60 m	sem drenos - colchão dren. areia

O anteprojeto do aterro previa três fases de execução: da 1ª fase constaria a execução de colchão drenante de areia com 0.50 m de espessura, com execução de drenos verticais e

elevação da altura do aterro até 2.50 m; na 2ª fase se elevaria a altura do aterro até 4.00 m com uma certa segurança à ruptura; finalmente na 3ª fase se elevaria o aterro rapidamente até a ruptura.

A execução do aterro se deu em duas fases, não tendo sido o mesmo levado à ruptura até a presente ocasião.

A 1ª fase, que corresponderia a uma etapa única de carregamento, foi realizada em duas etapas, pois ocorreu interrupção nos serviços normais por cerca de duzentos dias. Desta forma, a 1ª fase dividiu-se em duas etapas: na 1ª etapa foi feita a construção do colchão de areia, exceto na seção A onde foi utilizada uma manta geotêxtil, seguida de deposição de material de jazida (areia siltosa) até a altura aproximada de 1.00 m; na 2ª etapa, prosseguiu-se a deposição de material de jazida até altura aproximada de 2,00 m.

A 2ª fase de construção, correspondente à 3ª etapa de carregamento, constou de deposição de material de jazida até a altura aproximada de 3.50 m, exceto na seção A onde não foi executada a 2ª fase de construção.

A seção transversal aproximada do Aterro Experimental II encontra-se apresentada na figura IV.2.

A tabela IV.1 mostra as datas significativas para cada etapa de construção com as respectivas alturas atingidas e pesos específicos do material do aterro para cada uma das sete seções de acordo com TERRA (1988).

As figuras IV.3 a IV.5 (TERRA,1988) mostram graficamente a variação da altura do aterro com o tempo nas sete seções.

#### IV.4 Elementos Drenantes Utilizados

Foi executado um colchão drenante de areia como 1ª camada do aterro em todas as seções, com exceção da seção A, onde foi executado um colchão drenante tipo manta geotêxtil.

Nas seções B, C, D, E e F foram executados diferentes tipos de drenos, projetados quanto a suas dimensões e disposição no aterro para apresentarem a mesma eficiência teórica. Foram utilizados drenos de areia tipo ponta fechada (seção B), ponta aberta (seção C) e executados a jato d'água (seção D), bem como drenos sintéticos pré-fabricados fibroquímicos (seção E) e de geotêxtil (seção F), como ilustra a figura IV.1.

A construção dos drenos de areia tipo ponta fechada é feita por abertura de furos verticais utilizando-se equipamento para execução de estacas tipo Franki "standard", com formação da chamada "bucha-seca" e descida do tubo de revestimento por percussão de pilão sobre a "bucha-seca". Após a descida do tubo de revestimento procede-se à expulsão da bucha seguida de preenchimento do tubo com água, deposição de areia no seu interior através de operação manual e retirada do tubo de uma só vez.

Para execução dos drenos de areia tipo ponta aberta utiliza-se basicamente o mesmo equipamento utilizado para



execução dos drenos de areia tipo ponta fechada, sendo que o pilão é substituído por uma peça vazada denominada piteira. Neste processo, o tubo de revestimento desce até uma certa profundidade devido a seu peso próprio e, em seguida, pela transferência do peso da máquina para o tubo através de cabo de tração e limpeza do seu interior com auxílio da piteira. A retirada do tubo se dá concomitantemente com a operação de enchimento com areia.

A execução dos drenos de areia por jatos d'água é feita com utilização de um guindaste que sustenta um tubo para furação tendo na sua extremidade inferior um dispositivo para jateamento sob pressão. É feita a furação por jateamento com água e posterior lavagem do furo através de movimentos ascendentes e descendentes do tubo de furação. O preenchimento com areia é feito com auxílio de um funil posicionado sobre um tubo guia previamente instalado, sendo este tubo guia retirado ao final da operação.

Os drenos fibro-químicos são constituídos de um corpo drenante com 100 mm de largura e 2,8 mm de espessura, fabricado com material sintético. Sua execução empregou uma máquina de cravação, com haste cravadora, locomovendo-se sobre trilhos, e se deu por avanços sucessivos por cravação estática da haste à qual se prendia uma fita de dreno.

Os drenos de geotêxtil são constituídos de fita de Geotêxtil (Bidim-OP-60) com 21 cm de largura e espessura aproximada de 4,5 mm. Sua execução empregou um guindaste sobre esteiras, em cuja lança se situava um mandril de cravação

com vibrador aclopado, e se deu por cravação do mandril ao qual se prendia uma fita de dreno.

A tabela IV.2 apresenta um resumo das características das seções do Aterro II quanto aos tipos de elementos drenantes utilizados. Constan da tabela informações acerca dos tipos e geometria dos drenos verticais (seções B, C, D, E e F), bem como características do colchão drenante.

Para a determinação do diâmetro efetivo equivalente dos drenos sintéticos foi utilizada a relação de equivalência de área lateral por unidade de comprimento recomendada por KJELLMAN (1948) para filtros de papelão, segundo a qual:

$$\pi.d_w = (2A + 2B) \quad (IV.1)$$

$d_w$  = diâmetro efetivo equivalente de um dreno sintético

A = largura do dreno sintético

B = espessura do dreno sintético

TERRA (1988), por recomendação do fabricante do dreno fibro-químico AOKI-MORUMBI S/A, introduziu em (IV.1) um coeficiente de forma  $\alpha$  igual a 0,75, sendo então o diâmetro  $d_w$  determinado por:

$$d_w = \frac{(2A + 2B)}{\pi} \cdot \alpha = \frac{(2A + 2B)}{\pi} \cdot 0,75 \quad (IV.2)$$

O mesmo critério foi adotado para o dreno de geotêxtil.

#### IV.5 Instrumentação Geotécnica

A instrumentação geotécnica projetada para o Aterro II teve como finalidade proceder às seguintes medições: a) recalques por adensamento da camada argilosa em cada seção ao longo do aterro, bem como deslocamento de pontos a várias profundidades no interior da massa de argila mole; b) deslocamentos horizontais na base do aterro e em pontos no interior da camada argilosa; c) poro-pressões no interior da argila mole e nas camadas adjacentes ao depósito estudado.

Para medição de recalques e deslocamentos verticais foram usados placas de recalque na base do aterro, extensômetros magnéticos verticais, marcos superficiais e perfilômetro.

Para medição de deslocamentos horizontais foram usados inclinômetros e extensômetros magnéticos horizontais.

Para medição de poro-pressões desenvolvidas no maciço argiloso foram usados piezômetros Casagrande (tubulação aberta) e piezômetros hidráulicos de tubulação fechada.

Foram ainda utilizados medidores de nível d'água, referências de nível profundas ("bench-marks") e pinos de recalque nas casas de instrumentos e escritório.

São objeto do presente estudo apenas as placas de recalque, cujas localizações em planta se encontram apresentadas nas figuras IV.6 a IV.12.

#### IV.6 Características do Depósito Argiloso

O depósito argiloso na "Area Experimental do Sarapuí" tem espessura aproximada de 10 m, sendo sobrejacente a uma camada arenosa apresentando uma camada de transição argilo-arenosa. As espessuras médias iniciais estimadas para a camada de argila mole em cada seção, como assumidas por COLLET (1985) e TERRA (1988), são apresentadas a seguir:

Espessura H = 2H <sub>a</sub> da camada argilosa em cada seção (m)						
A	B	C	D	E	F	G
10,5	10,5	10,5	10,5	10,2	10,0	9,0

Os resultados da análise química, que estão resumidos em ORTIGAO (1980) e ORTIGAO E LACERDA (1980), encontram-se com maiores detalhes em ANTUNES (1976).

Segundo ANTUNES (1976) os depósitos de argila mole da região da Baixada Fluminense foram formados a partir de sedimentos flúvio-marinhos do período quaternário (6000 anos), tendo a argila coloração cinza, podendo por vezes ser preta, devido à matéria orgânica presente a um teor da ordem de 5%. A caulinita é o principal argilo-mineral constitutivo, ocorrendo ainda a presença de outros argilo-minerais tais como a montmorilonita e illita. A argila do Sarapuí apresenta-se bastante uniforme, sem veios de areia ou silte.

Os resultados de ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), e umidade natural (W), sem secagem prévia, realizados por ORTIGAO (1980), estão representados ao longo da profundidade na figura IV.13. O índice de plasticidade (IP) obtido a partir desses resultados é da ordem de 80 a 90%. Verifica-se também ser a umidade natural da argila um pouco superior ao limite de liquidez, evidenciando um índice de liquidez superior à unidade. Esse fato, segundo ORTIGAO (1980), geralmente é característico de argilas muito sensíveis. Ensaio de palheta de campo realizados por COLLET (1978) na argila do Sarapuí evidenciaram sensibilidade relativamente baixa: valor médio igual a 2,6 e desvio padrão igual a 0,7. Uma segunda campanha de ensaios realizada por ORTIGAO E COLLET (1986), na qual se procurou minimizar o efeito de atrito nas hastes, obteve como resultados para a sensibilidade da argila do Sarapuí, um valor médio igual 4,4 e desvio padrão igual a 1,3.

Cerca de 55% em peso correspondem à fração argila ("diâmetro" das partículas menor que 0,002 mm) de acordo com ensaios granulométricos realizados por ORTIGAO (1980), ou cerca de 59% segundo COSTA FILHO e outros (1985), ou ainda 60% a 70% segundo VIEIRA (1988).

A densidade dos grãos apresenta valor médio igual a 2,61 de acordo com COSTA FILHO e outros (1985), e 2,67 de acordo com ensaios realizados por VIEIRA (1988).

Quanto aos parâmetros de resistência (efetivos), segundo GERSCOVICH e outros (1986) e ORTIGAO (1980), tem-se, até a

profundidade de 2,0 metros, coesão ( $c'$ ) igual a 15 kPa e ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) igual a  $30^\circ$  e para profundidades superiores a 2,0 metros,  $c' = 0$  e  $\phi' = 25^\circ$ .

Com o principal objetivo de obter informações acerca da **história de tensões**, ORTIGAO (1980) realizou 63 ensaios oedométricos no depósito de argila mole do Sarapuí, os quais evidenciaram um certo pré-adensamento ao longo de toda a camada de argila.

Os resultados de  $\sigma'_{vm}$  (tensão de sobre-adensamento) e OCR ("over consolidation ratio" - razão de sobre-adensamento) ao longo da espessura do depósito, obtidos por ORTIGAO (1980), estão apresentados na figura IV.14. A faixa de valores obtidos por ORTIGAO (1980) é coerente com os resultados obtidos por COUTINHO (1976), DUARTE (1977) e COLLET (1985).

A figura IV.14 mostra também a variação de  $\sigma'_{vo}$  (tensão efetiva vertical "in situ"), considerando-se um valor médio e único de  $\gamma$  (peso específico total) igual a  $13,2 \text{ kN/m}^3$  para o depósito, admitindo-se nível d'água do lençol na superfície do terreno, de acordo com ORTIGAO (1980).

Quanto aos **parâmetros de adensamento**, do trabalho de COUTINHO e LACERDA (1976) foi retirada a figura IV.15, que mostra os valores de coeficientes de adensamento vertical ( $c_v$ ) e horizontal ( $c_h$ ) em função da tensão efetiva,  $\sigma'_v$ , obtidos em ensaios de drenagem radial e vertical realizados por aqueles autores citados. A relação entre o coeficiente de

adensamento horizontal ( $c_h$ ) e vertical ( $c_v$ ) pode ser obtida da figura IV.15 ou diretamente da figura IV.16 de LACERDA e outros (1977). Essa figura mostra a relação entre  $c_{hm}$  (média de ensaios com drenagem radial externa) e  $c_{vm}$  (média de ensaios convencionais ou de drenagem vertical) para ensaios realizados com amostras retiradas em duas profundidades diferentes, verificando-se que esta relação cresce de um valor igual a 1,0, na região sobreadensada, até atingir o valor máximo da ordem de 2,0 na região normalmente adensada.

A figura IV.15 mostra também a faixa de tensões ( $\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v$ ) obtida por TERRA (1988) para a primeira e segunda fases de carregamento. O cálculo da distribuição de tensões do aterro na camada de argila foi efetuado por TERRA (1988) de acordo com o método indicado por NAVFAC-DM7 (1971), sob o centro de cada seção do aterro, considerando o efeito de submersão de acordo com método proposto por CRUZ E SAES (1972).

Com relação aos parâmetros de compressibilidade, os valores de índice de compressão ( $c_c$ ) e recompressão ( $c_r$ ) encontrados por ORTIGAO E LACERDA (1980) variam de  $c_c=2,13$  até 4 metros de profundidade a  $c_c=1,53$  a 10 metros de profundidade e de  $c_r=0,37$  até 4 metros de profundidade a  $c_r=0,34$  a 10 metros de profundidade. Os valores médios encontrados por COUTINHO E LACERDA (1976) foram  $c_c=1,60$  e  $c_r=0,36$  para amostras extraídas às profundidades de 6 e 8 metros.

Os resultados obtidos por ORTIGAO (1980) quanto aos parâmetros de compressibilidade  $RR$  e  $CR$ , correspondentes respec-

tivamente aos trechos de recompressão e virgem da curva  $\epsilon_v \times \log \sigma'_v$ , estão apresentados na figura IV.17. Percebe-se que os resultados do coeficiente de recompressão  $RR$  ( $RR=c_r/(1+e_o)$ ) são muito dispersos dificultando conclusões sobre sua variação com a profundidade. No caso de  $CR$  ( $CR=c_o/(1+e_o)$ ) há uma menor dispersão dos resultados e uma tendência de que os valores se mantenham constantes ao longo da espessura da camada, indicando que os mesmos independem da profundidade.

O valor médio do módulo de compressibilidade volumétrica,  $m_v$ , é igual a  $0,003 \text{ m}^2/\text{kN}$ , segundo COUTINHO (1976).



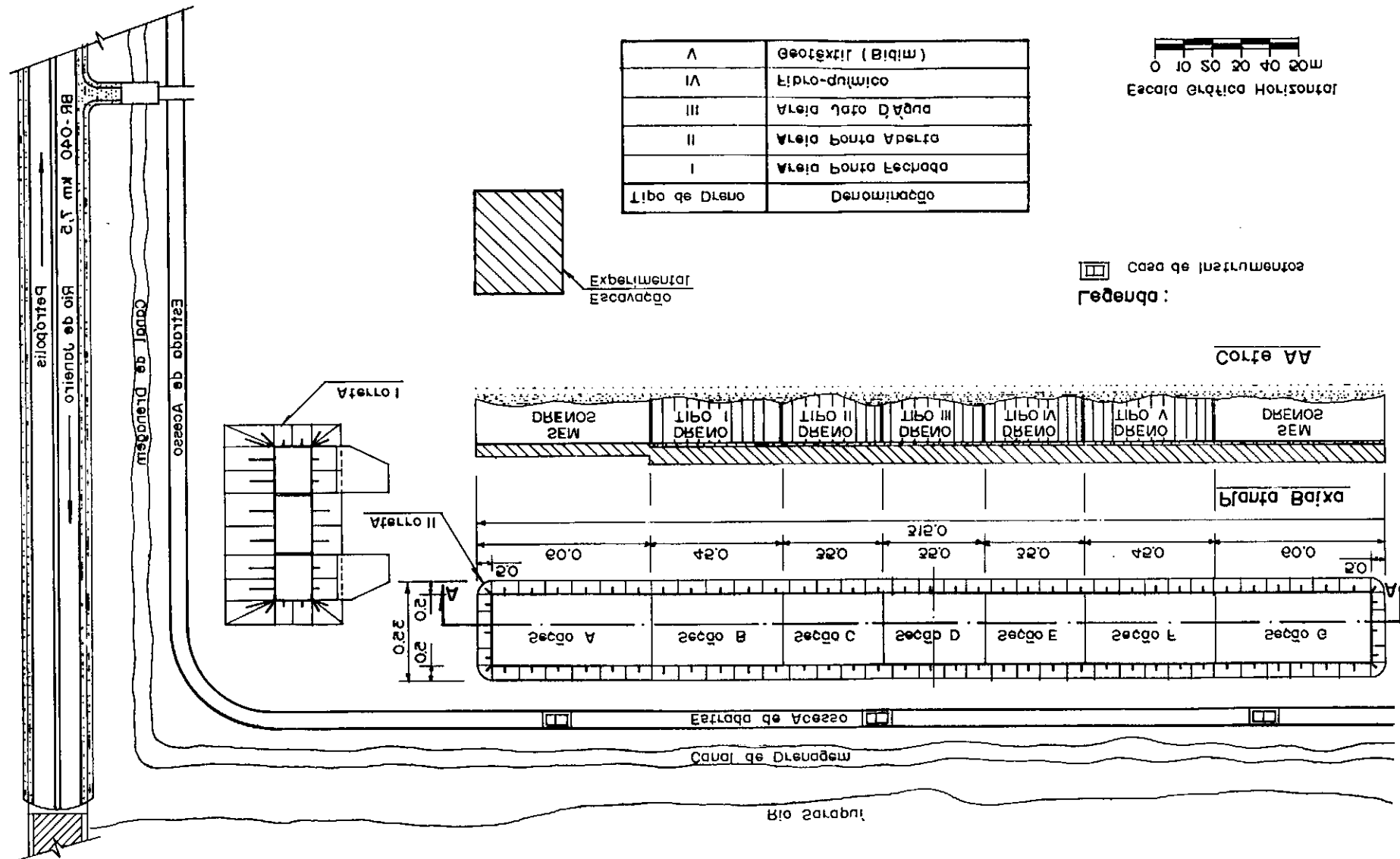
**TABELA IV.1 ETAPAS DE CONSTRUÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL II**

S E C Ç Ã O	1ª Fase de Carregamento										2ª Fase de Carregamento				
	1ª Etapa de Carregamento					2ª Etapa de Carregamento					3ª Etapa de Carregamento				
	DATA DO INÍCIO DA CONSTRUÇÃO	DATA DO FINAL DA CONSTRUÇÃO	TEMPO DE CONSTRUÇÃO (dias)	PESO ESPECÍFICO TOTAL DO ATERRO (kN/m³)	ALTURA ATINGIDA PELO ATERRO (m)	DATA DO INÍCIO DA CONSTRUÇÃO	DATA DO FINAL DA CONSTRUÇÃO	TEMPO DE CONSTRUÇÃO (dias)	PESO ESPECÍFICO TOTAL DO ATERRO (kN/m³)	ALTURA ATINGIDA PELO ATERRO (m)	DATA DO INÍCIO DA CONSTRUÇÃO	DATA DO FINAL DA CONSTRUÇÃO	TEMPO DE CONSTRUÇÃO (dias)	PESO ESPECÍFICO TOTAL DO ATERRO (kN/m³)	ALTURA ATINGIDA PELO ATERRO (m)
<b>A</b>	20/11/80	28/01/81	69	19,3	1,05	30/08/81	20/10/81	51	19,3	1,80	-	-	-	-	-
<b>B</b>	26/12/80	28/01/81	33	19,8	0,80	16/08/81	20/10/81	65	19,4	1,80	15/01/86	27/01/86	12	15,5	3,50
<b>C</b>	23/12/80	30/01/81	38	19,7	0,65	22/08/81	30/10/81	69	19,5	1,80	14/01/86	24/01/86	10	15,8	3,50
<b>D</b>	22/12/80	30/01/81	39	19,7	0,65	21/08/81	02/11/81	73	19,5	2,10	16/01/86	24/01/86	08	16,0	3,80
<b>E</b>	12/12/80	28/12/80	16	20,2	0,40	08/08/81	30/11/81	114	19,5	1,90	17/01/86	25/01/86	08	14,8	3,60
<b>F</b>	20/12/80	26/01/81	37	19,8	0,70	12/08/81	16/12/81	126	19,4	1,90	18/01/86	25/01/86	07	16,2	3,60
<b>G</b>	08/01/81	30/01/81	22	19,5	0,90	26/08/81	07/07/82	316	19,5	1,90	21/01/86	27/01/86	06	16,8	3,60

**TABELA IV.2 CARACTERÍSTICAS DAS SEÇÕES DO ATERRO EXPERIMENTAL II**  
(Quanto Aos Elementos Drenantes)

SEÇÃO	TIPO DE COLCHÃO DRENANTE	ESPESSURA DO COLCHÃO (m)	TIPO DE DRENO	DIÂMETRO EFETIVO DO DRENO DE AREIA OU DIÂMETRO EQUIVALENTE DO DRENO PRÉ-FABRICADO (dw) (m)	ESPAÇAMENTO ENTRE DRENOS (m)	TIPO DE MALHA	NÚMERO DE DRENOS
A	Manta Geotextil (Bidim OP-60)	$4,5 \times 10^{-3}$	—	—	—	—	—
B	Areia	0,41	Areia-Ponta Fechada	0,40	2,50	QUADRADA	216
C	Areia	0,32	Areia-Ponta Aberta	0,40	2,50	QUADRADA	168
D	Areia	0,31	Areia-Jato d'água	0,40	2,50	QUADRADA	168
E	Areia	0,43	Pré-fabricado Fibro-Químico	$5,0 \times 10^{-2}$	1,70	QUADRADA	320
F	Areia	0,39	Pré-fabricado de Geotextil (Bidim OP-60)	$10,0 \times 10^{-2}$	2,00	QUADRADA	322
G	Areia	0,34	—	—	—	—	—

Figura IV.1 - Localização, Planta e Corte Longitudinal do Aterro Experimental II.



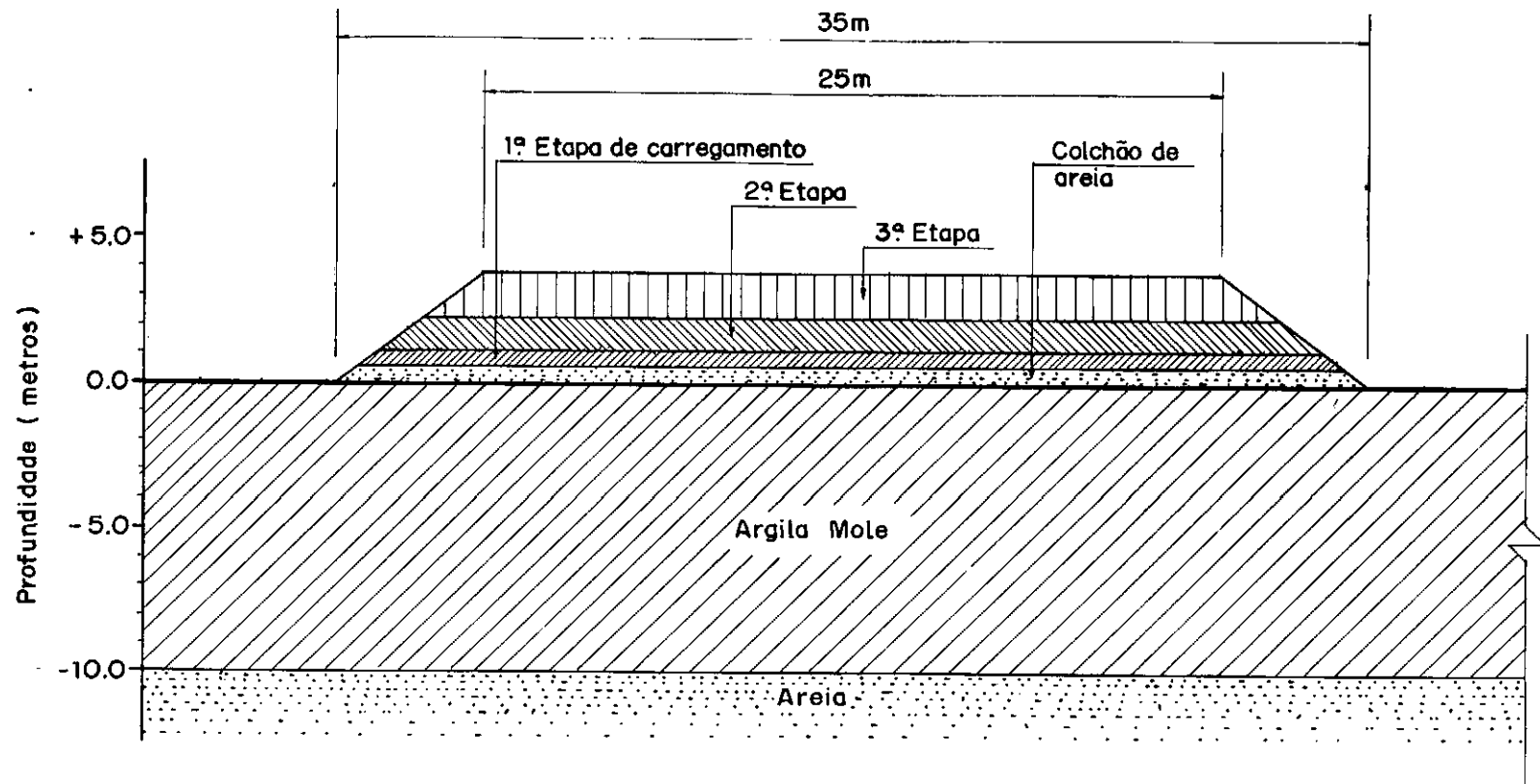


Figura IV.2 - Seção Transversal do Aterro Experimental II. ( Apud TERRA, 1988 )

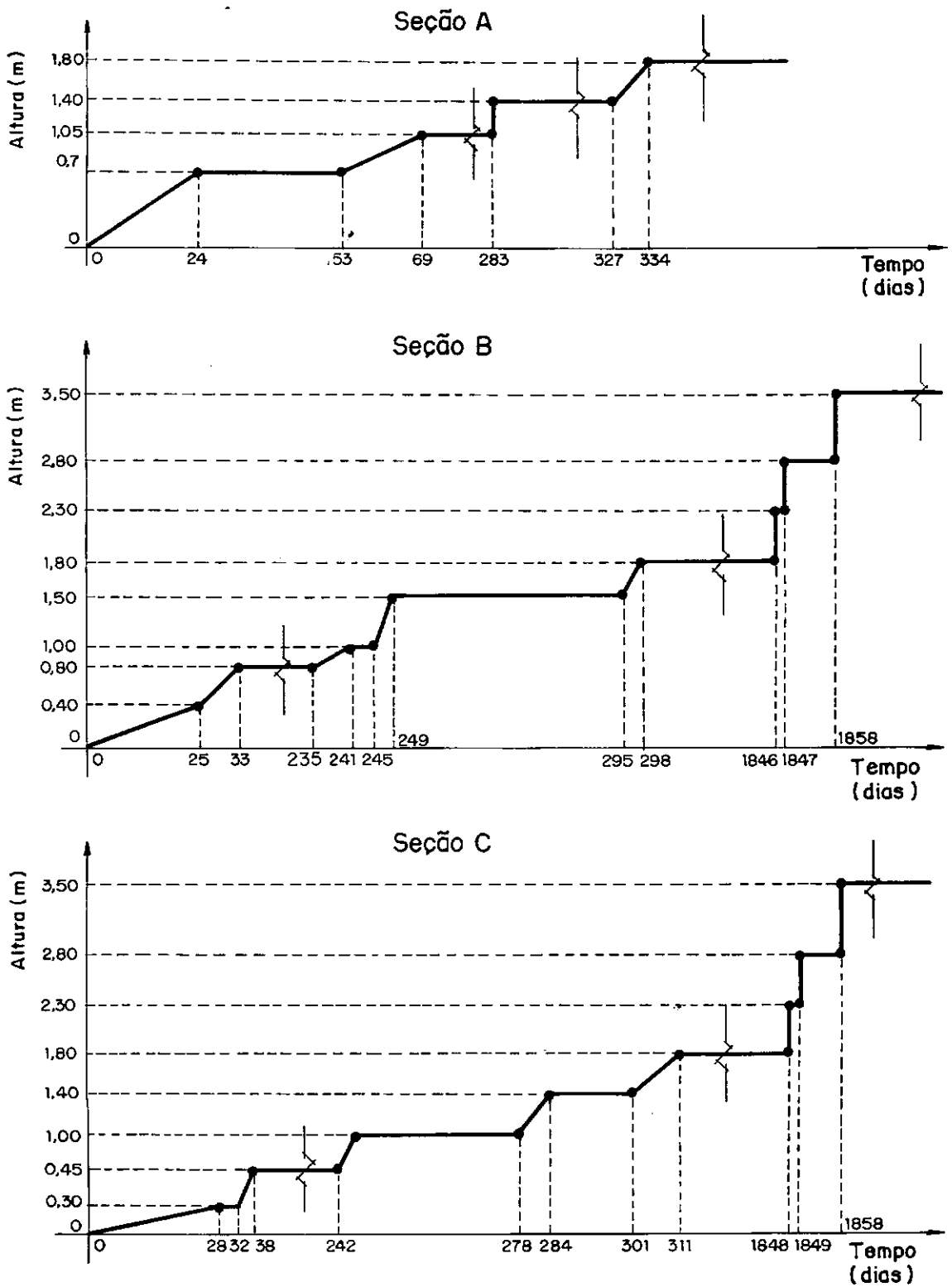


Figura IV.3 - Variação de altura do Aterro Experimental II ao longo do tempo ( Seções A,B e C ).

( Apud TERRA, 1988 )

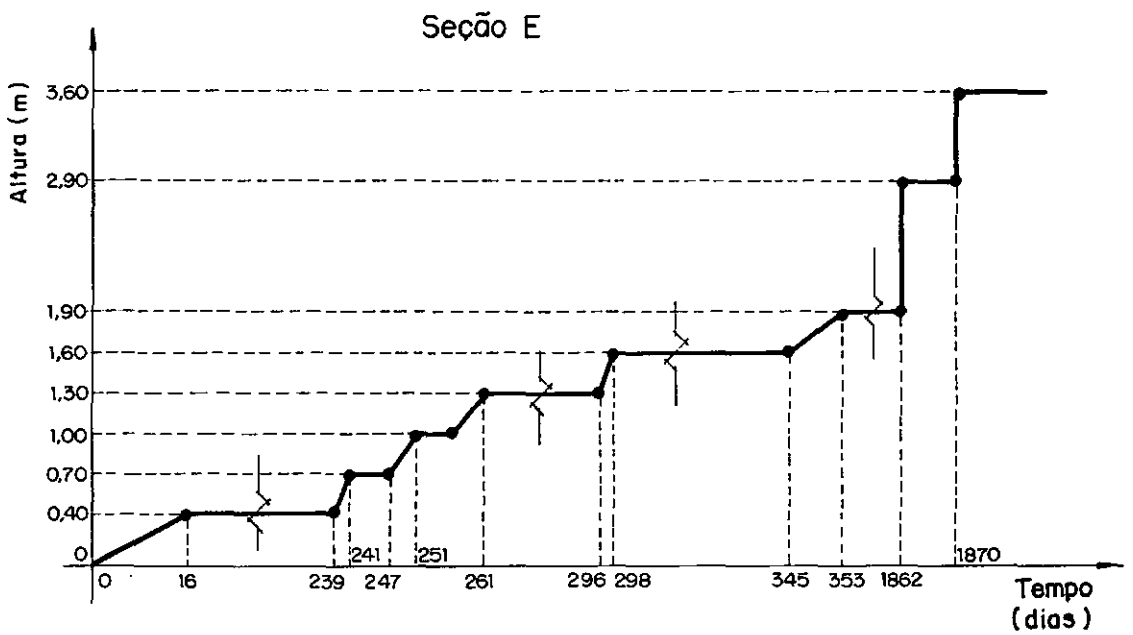
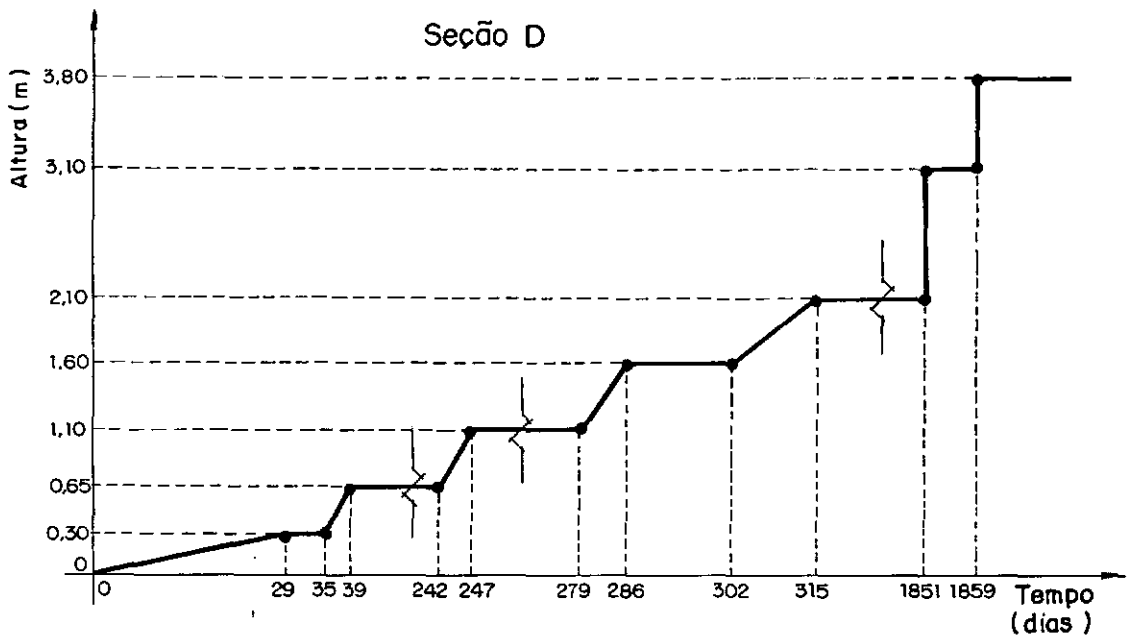


Figura IV.4 - Variação de altura do Aterro Experimental II ao longo do tempo ( Seções D e E ).

( Apud TERRA, 1988 )

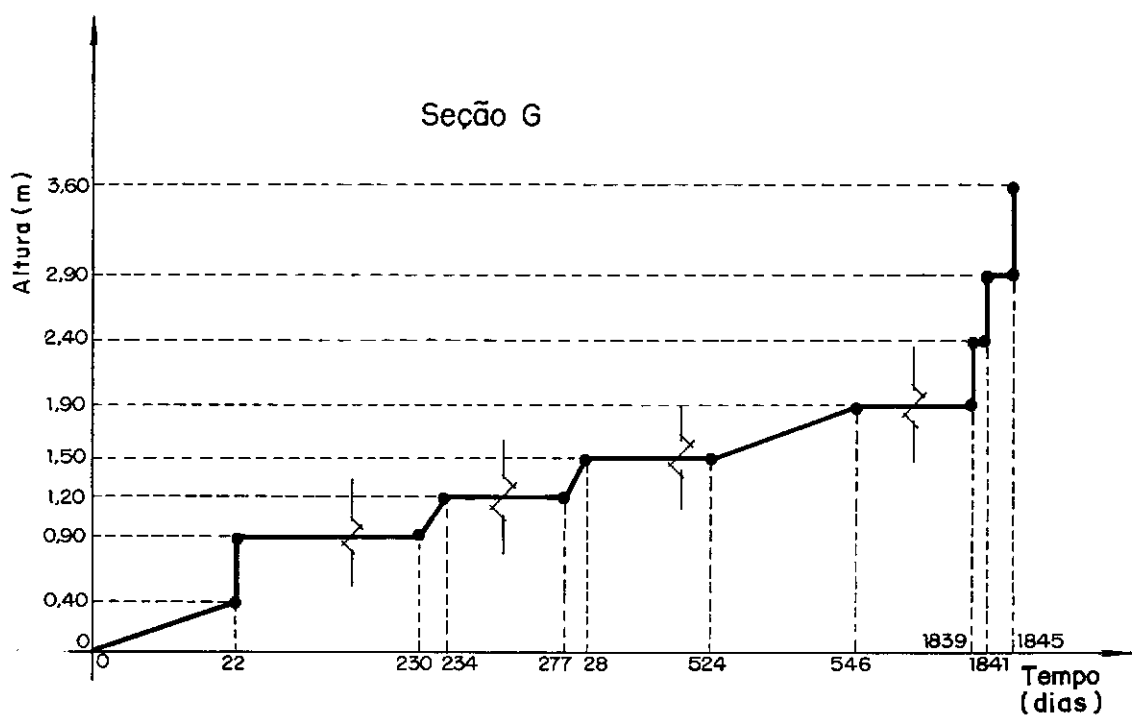
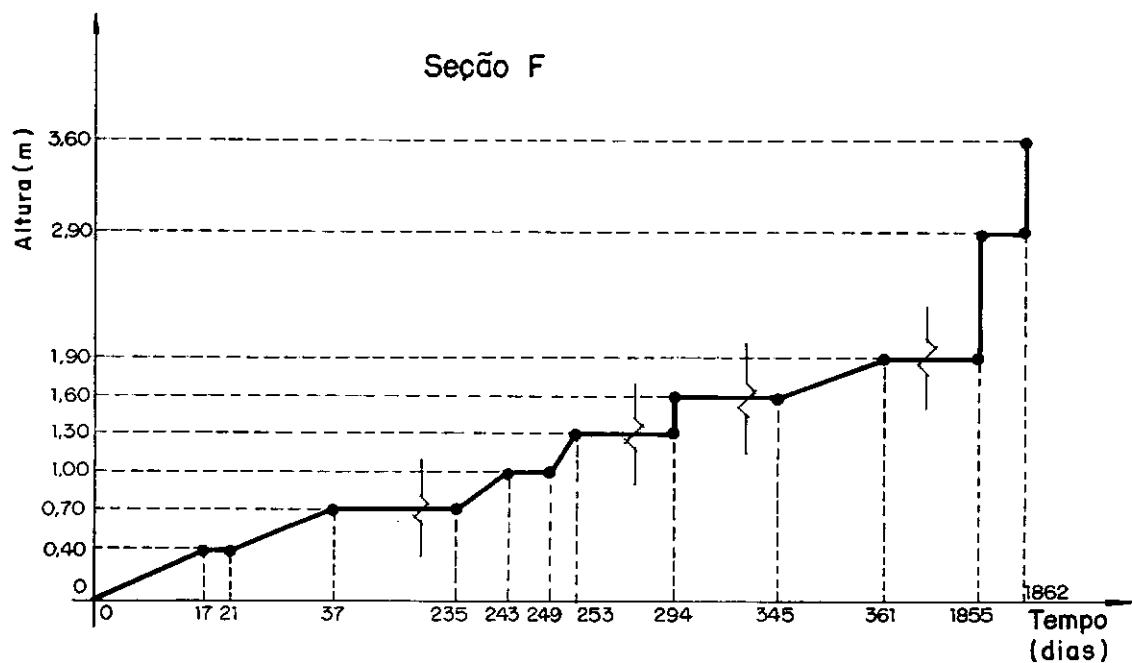


Figura IV.5 - Variação de altura do Aterro Experimental II ao longo do tempo ( Seções Fe G ).

( Apud TERRA, 1988 )

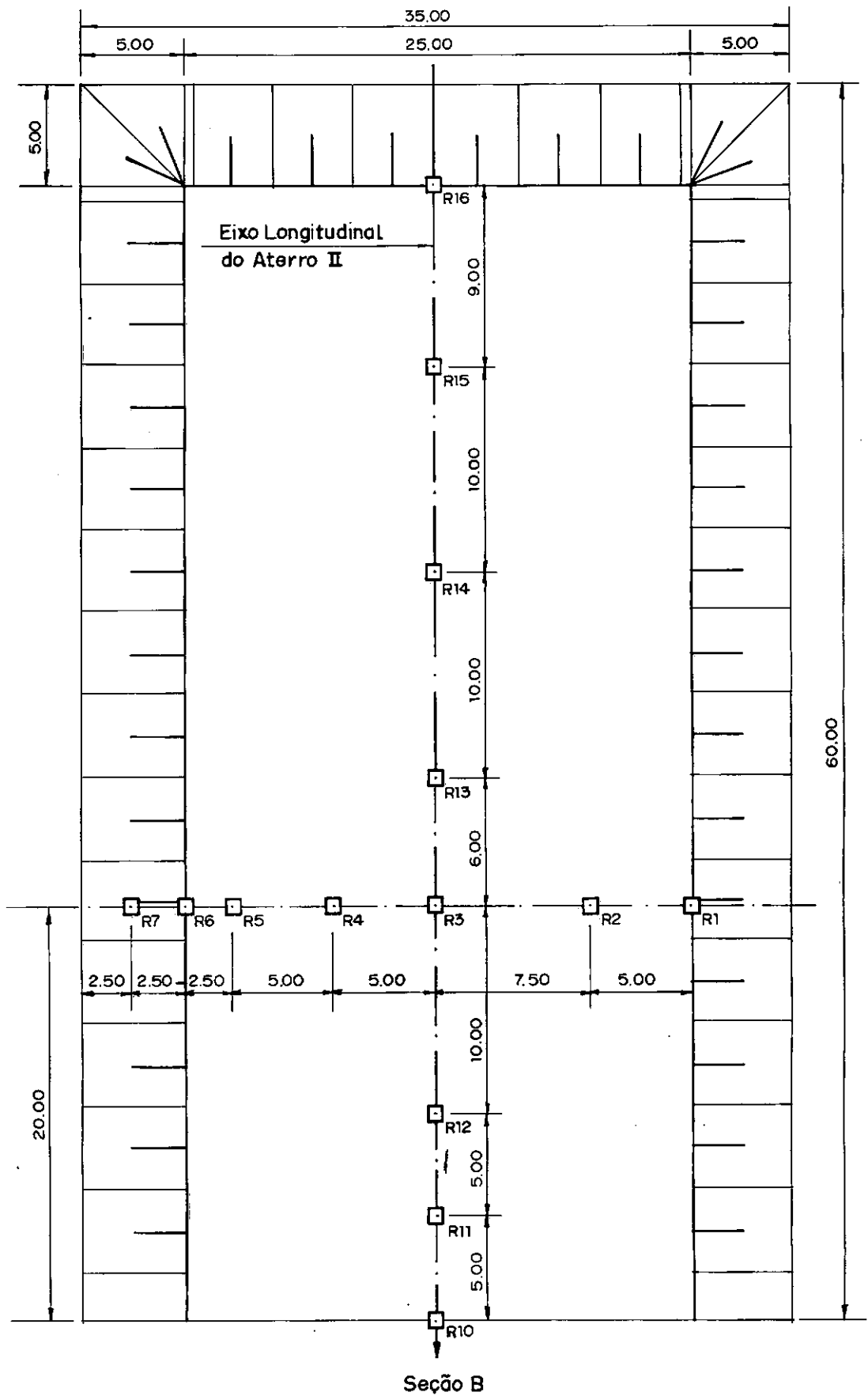
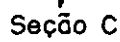


Figura IV.6 - Localização das placas de recalque em planta - Seção A.  
(Apud COLLET, 1985)





(Apud COLLET, 1985)

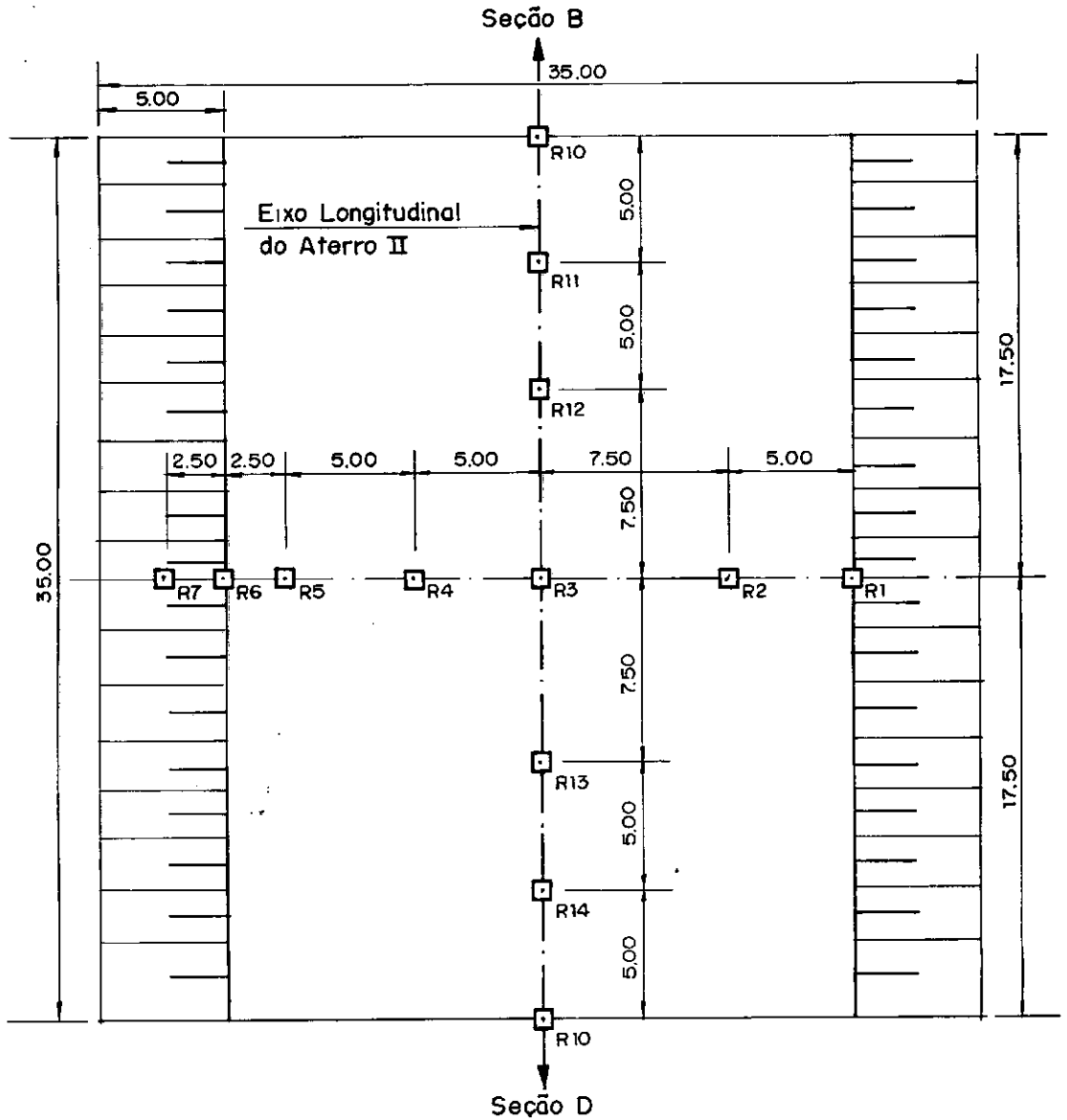


Figura IV.8 - Localização das placas de recalque em planta - Seção C.  
(Apud COLLET, 1985)

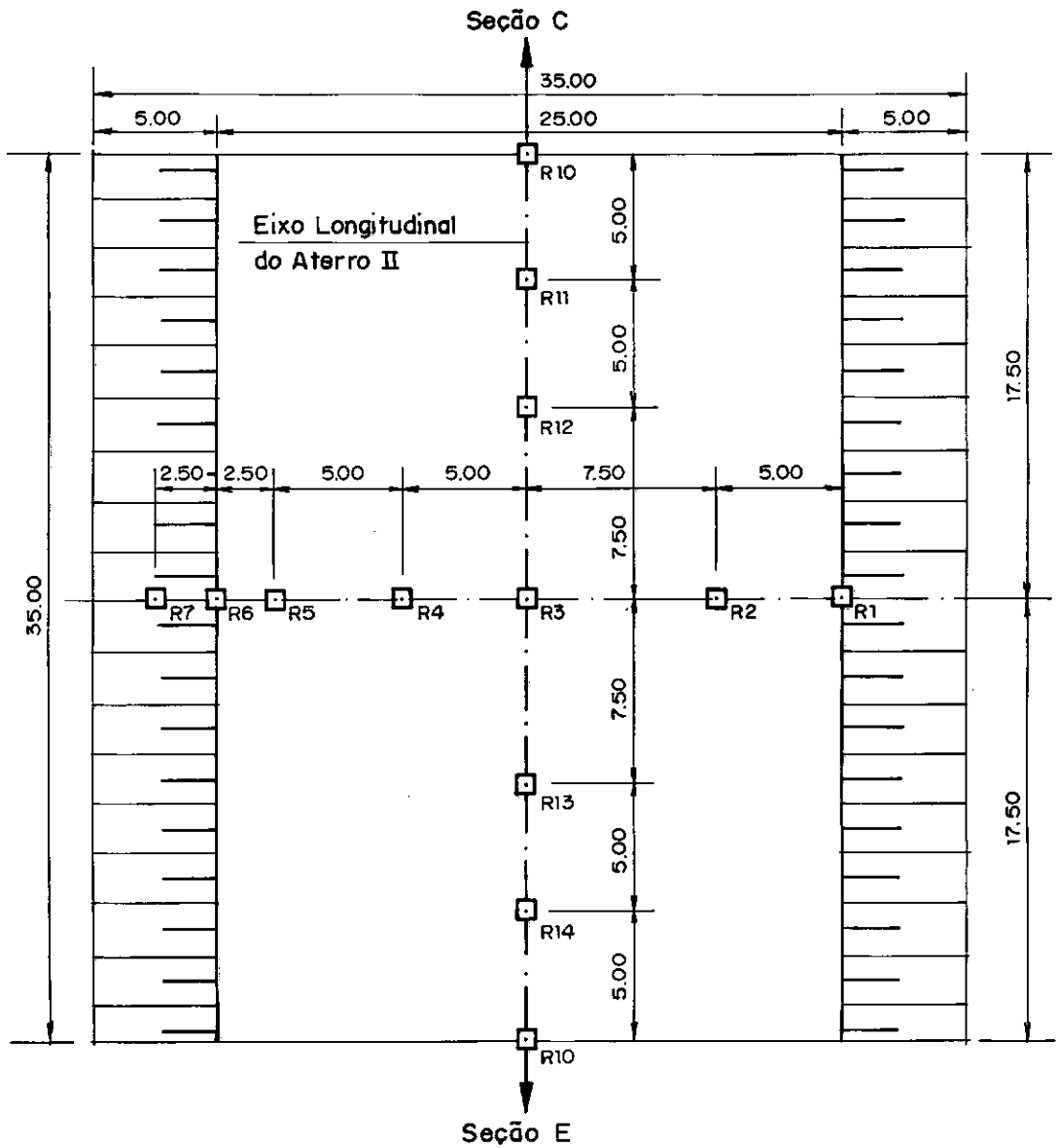


Figura IV.9 - Localização das placas de recalque em planta - Seção D.  
( Apud COLLET, 1985)

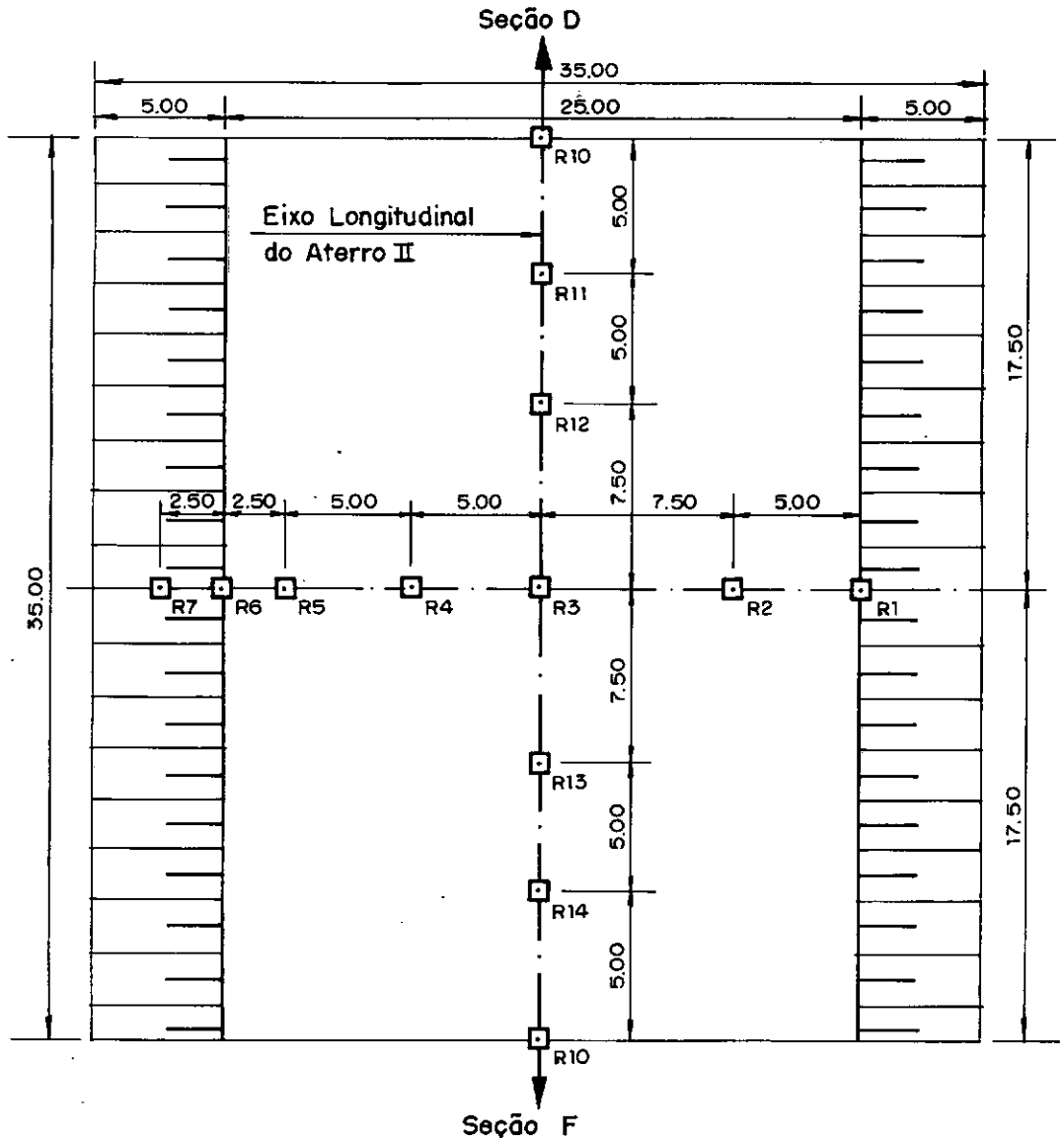


Figura IV.10 - Localização das placas de recalque em planta - Seção E.  
(Apud COLLET, 1985)

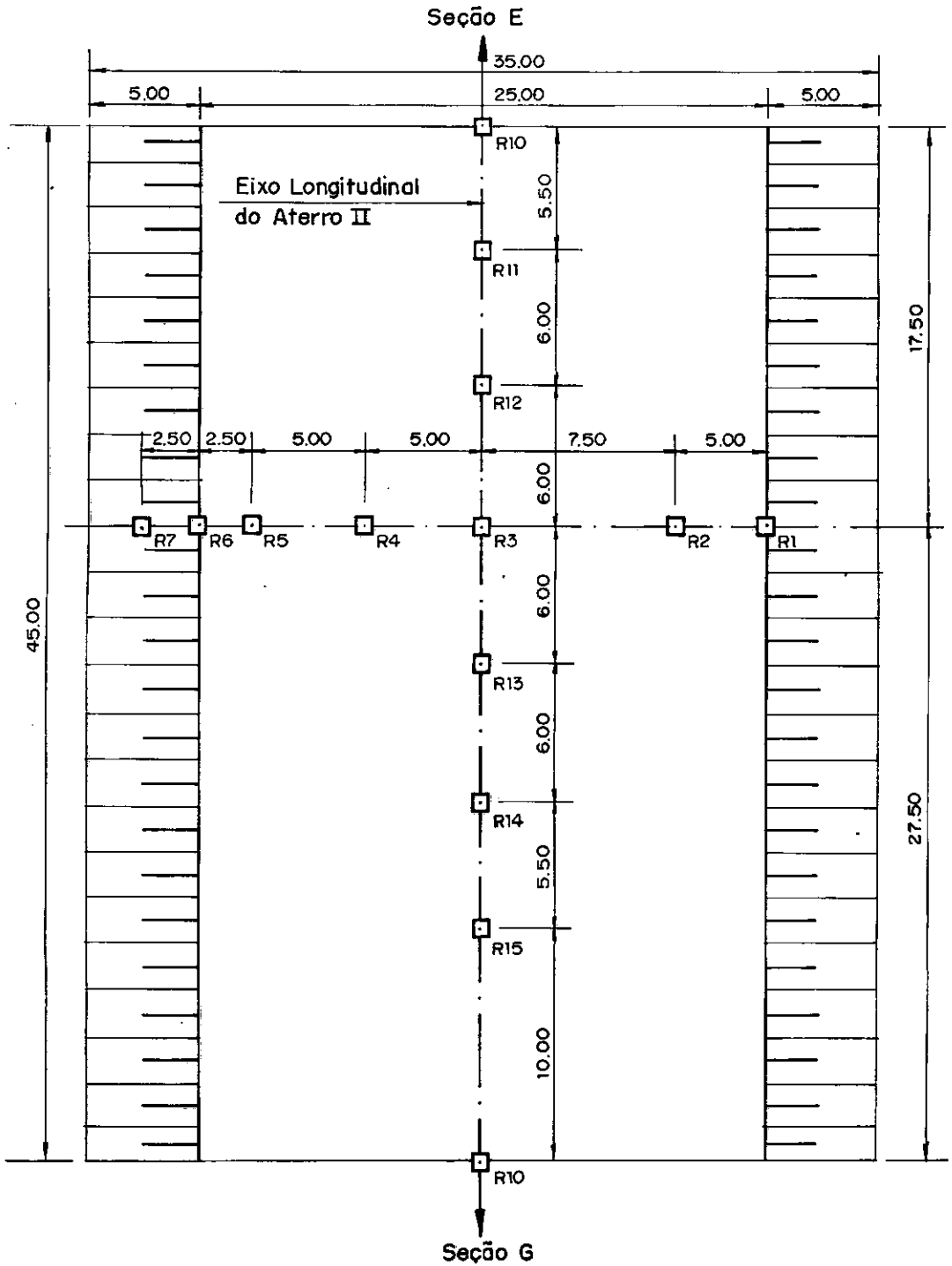


Figura IV.11 - Localização das placas de recalque em planta - Seção F.  
(Apud COLLET, 1985)

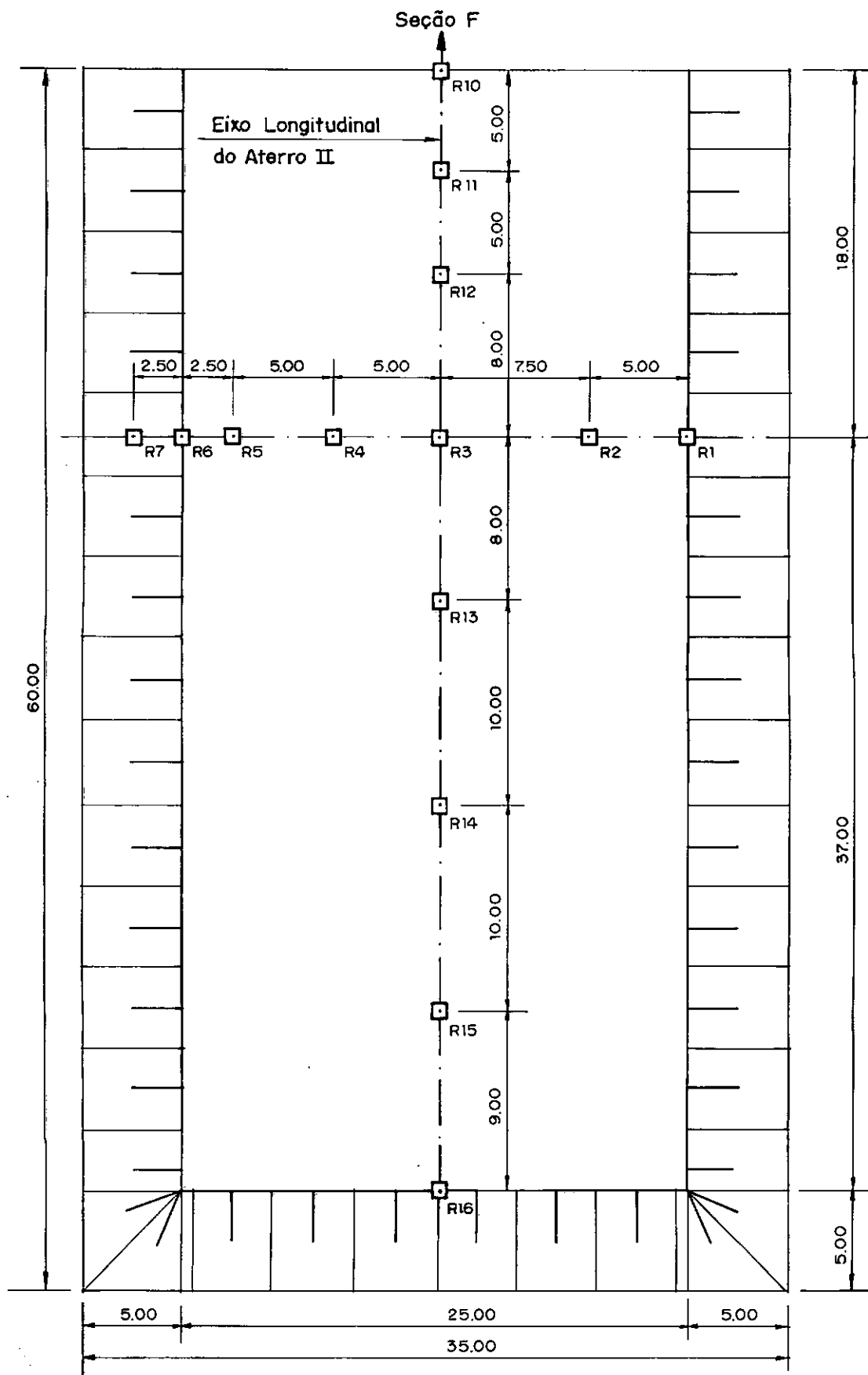


Figura IV.12 - Localização das placas de recalque em planta - Seção G.  
( Apud COLLET, 1985)

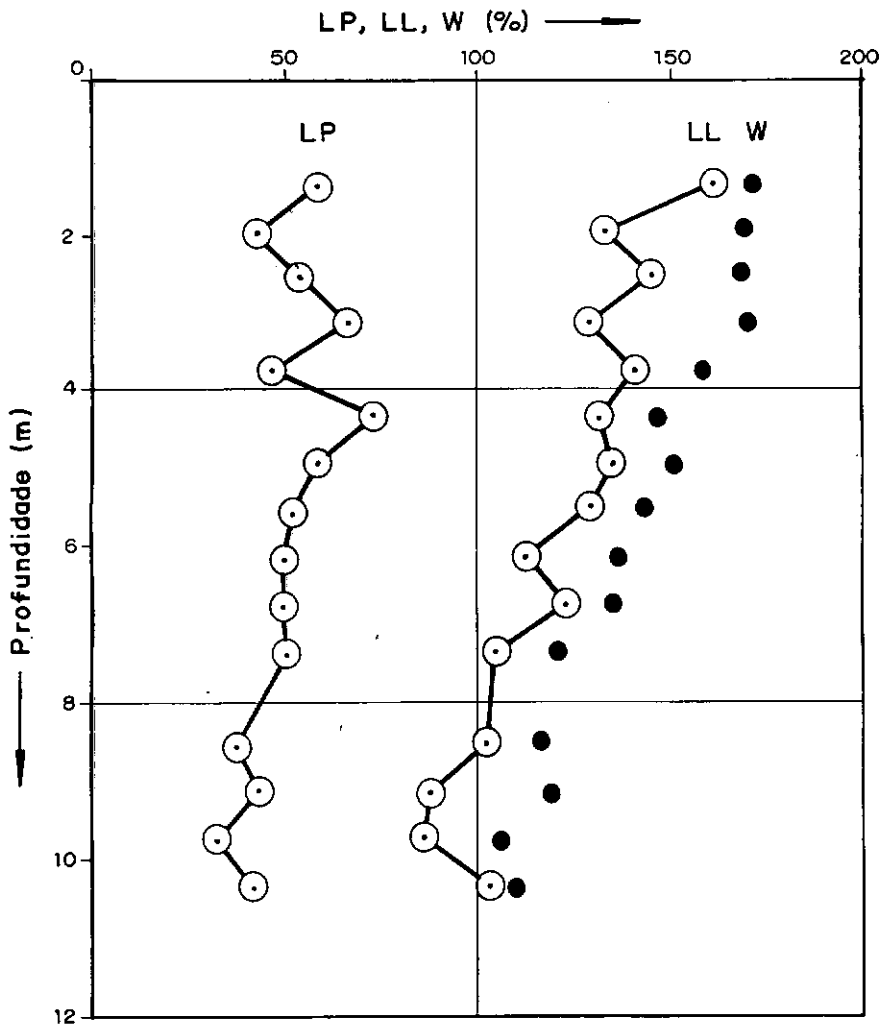


Figura IV.13 - Limites de Atterberg ao longo da profundidade.  
(APUD ORTIGÃO, 1980)

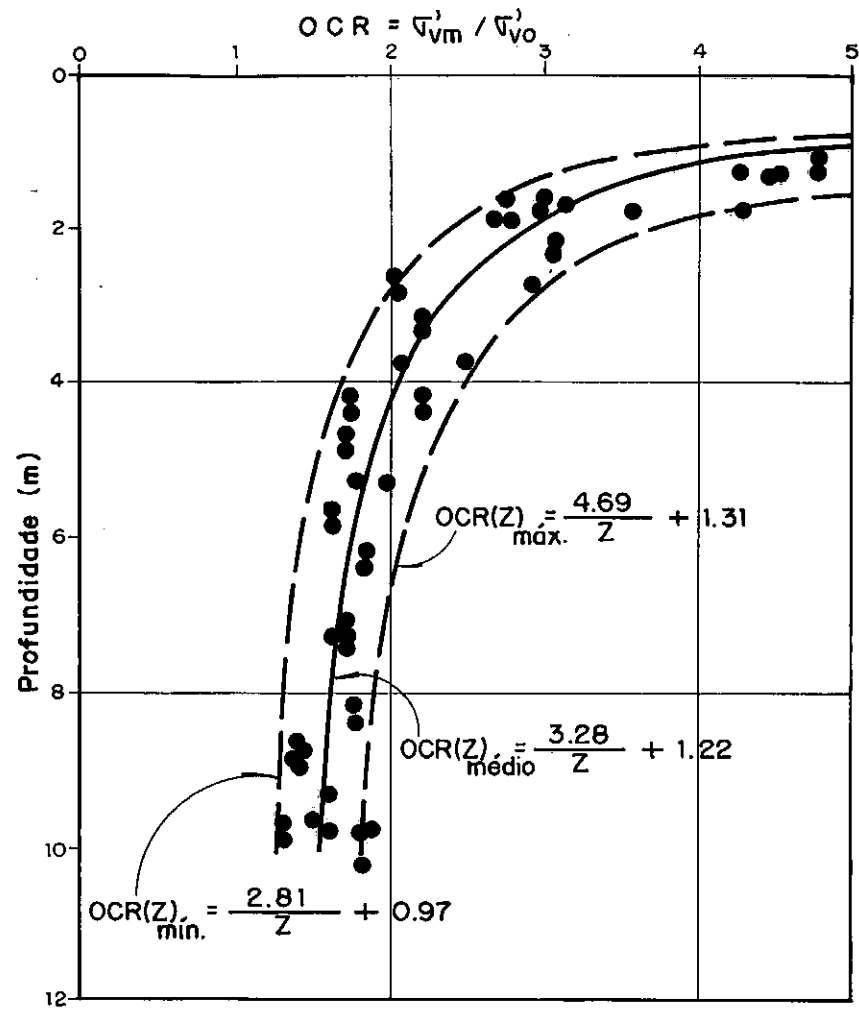
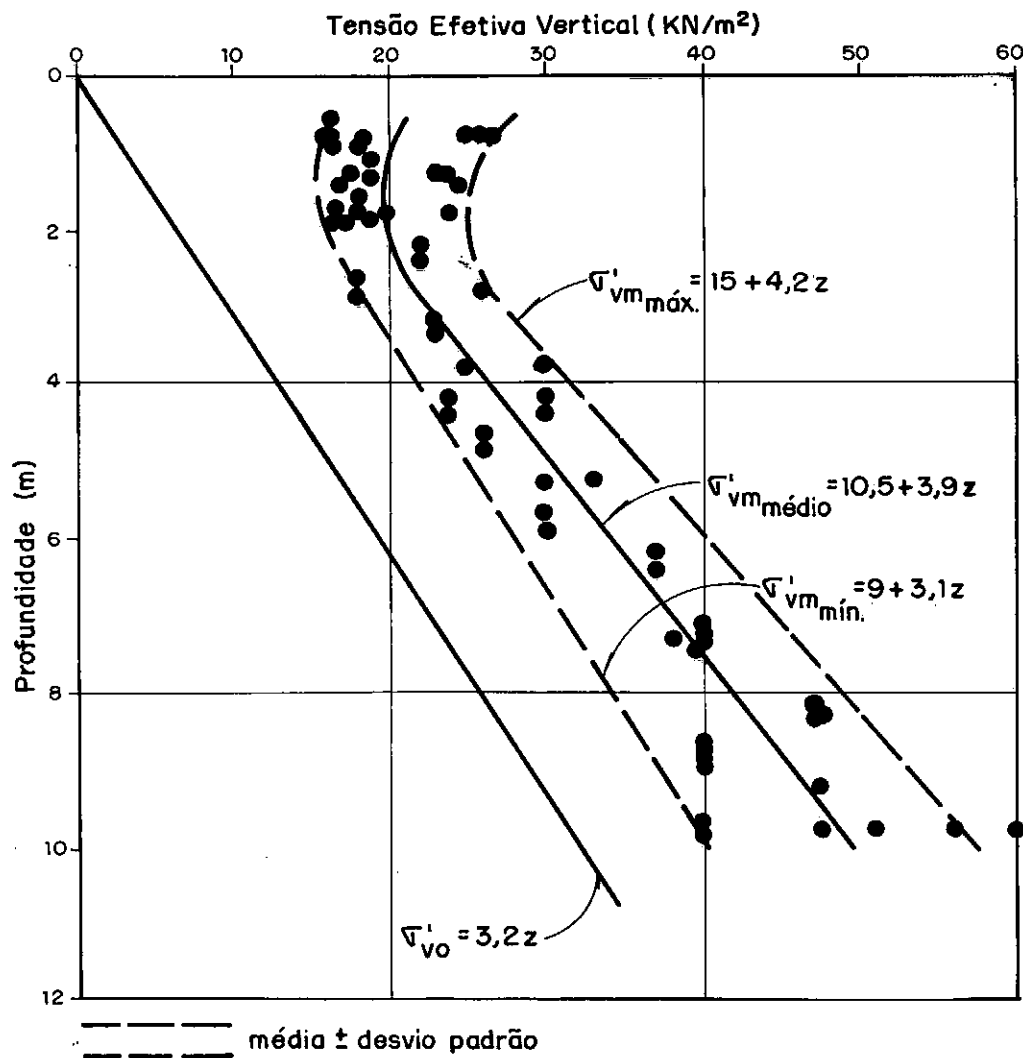


Figura IV.14 - História de tensões - Ensaios oedométricos ( Apud ORTIGÃO(1980) ).



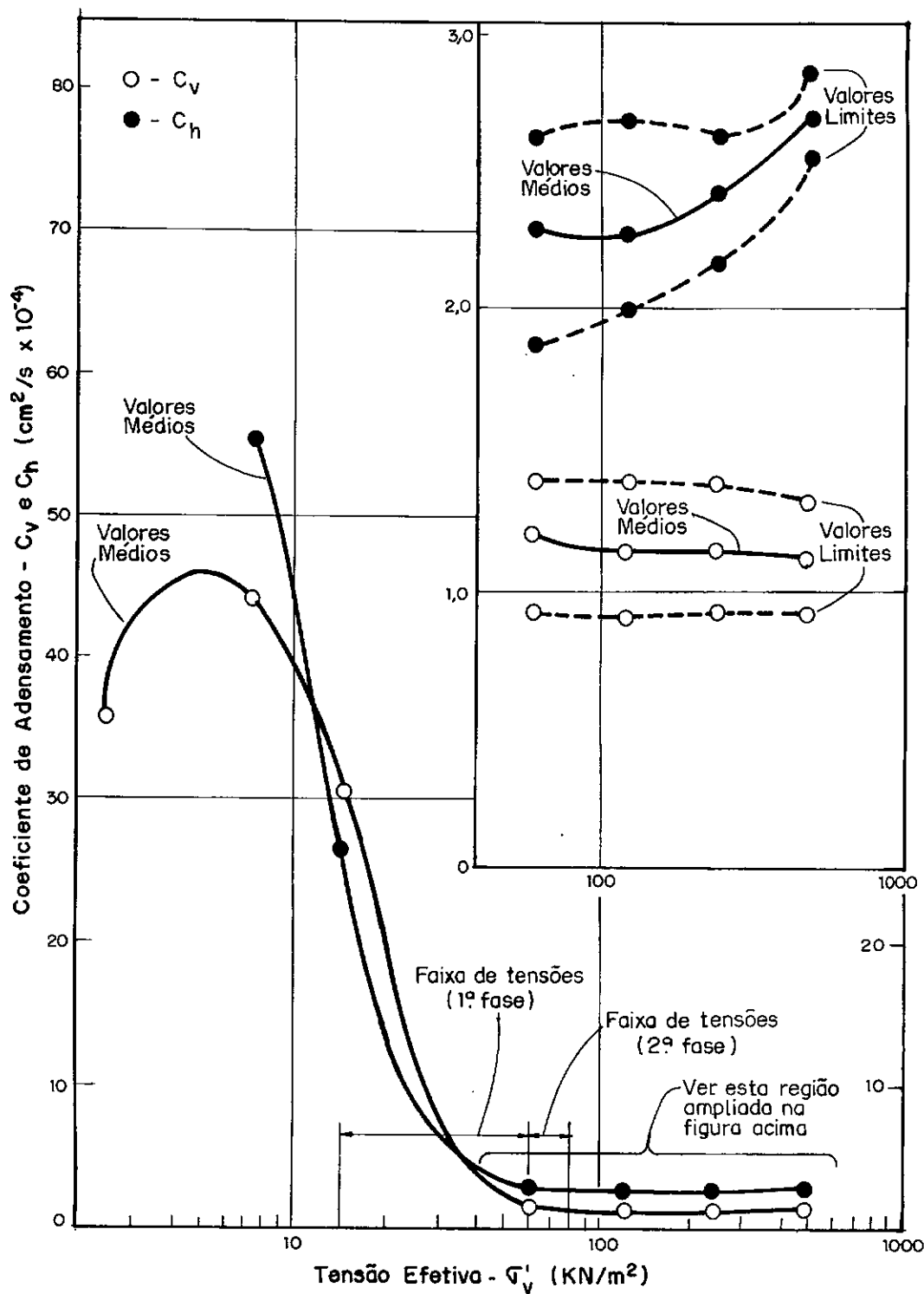


Figura IV.15 - Variação de  $C_v$  e  $C_h$  com a tensão efetiva  $\sigma'_v$   
 Valores determinados em laboratório (APUD COUTINHO e LACERDA - 1976).

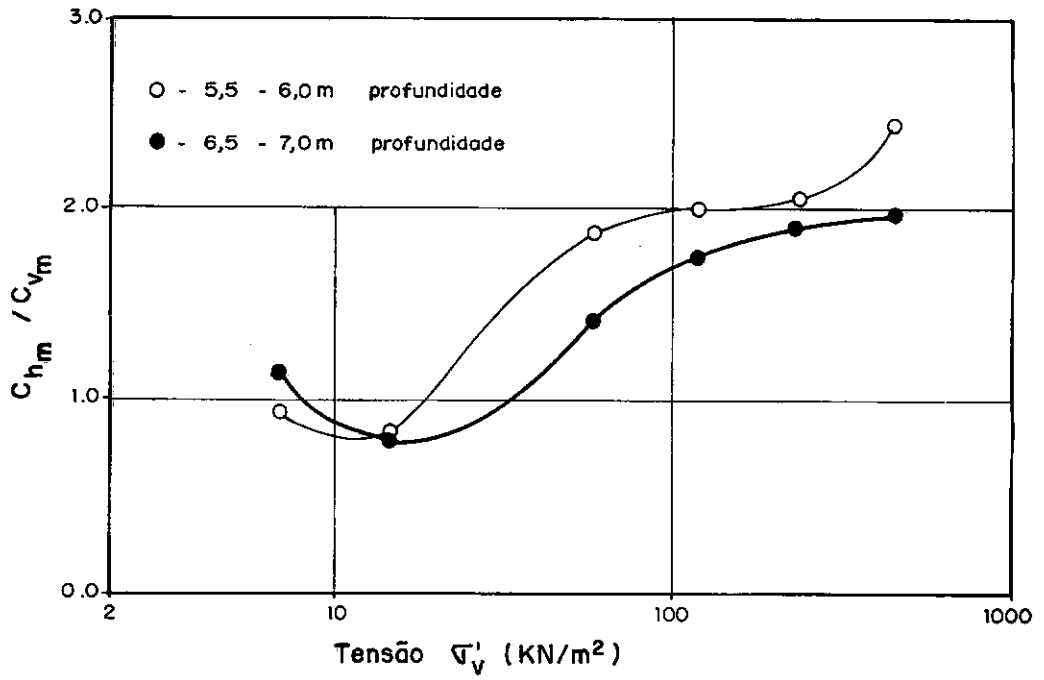


Figura IV.16 - Relação ( $C_{h_m} / C_{v_m}$ ) para ensaios com drenagem radial externa (APUD LACERDA e outros, 1977).

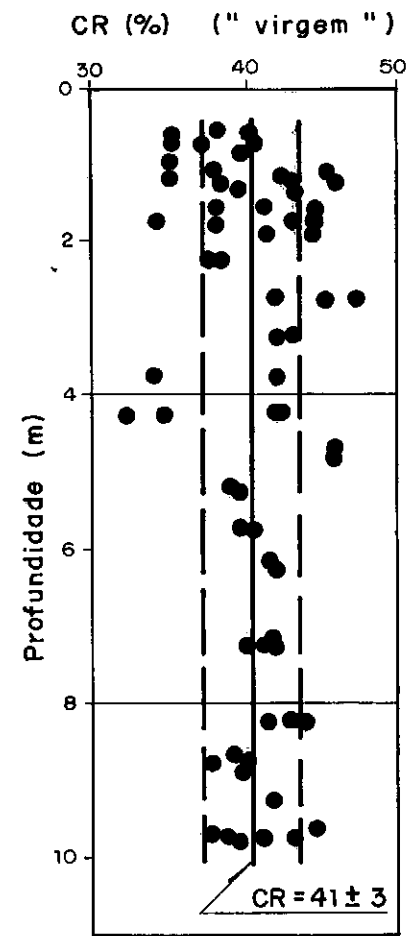
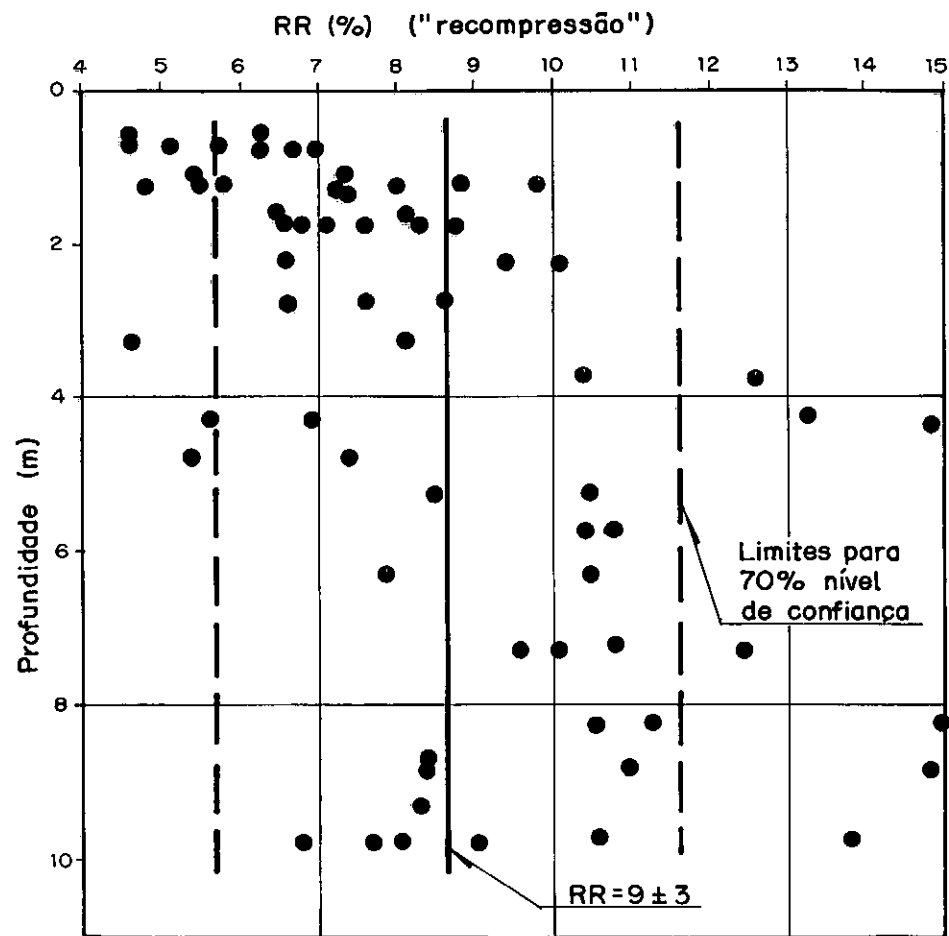


Figura IV.17 - Parâmetros de compressibilidade - Ensaios oedométricos ( Apud ORTIGÃO (1980) ).

## CAPÍTULO V

### Revisão de Conceitos de Probabilidade e Estatística

#### V.1 Introdução

Em virtude da utilização de um tratamento probabilístico na análise das medições de recalques, para estimativa dos coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  das retas de Asaoka, e dos valores dos recalques finais  $S_\infty$  e coeficientes de adensamento verticais e horizontais ( $c_v$  e  $c_h$ ) a partir dos primeiros, torna-se necessária uma breve revisão dos conceitos de probabilidade e estatística aplicados à análise em questão.

Esta revisão baseou-se, entre outros, no trabalho de ANDRADE LIMA (1991), do qual foi transcrita resumidamente a parte referente à conceituação de regressão linear e estabelecimento de intervalos de confiança.

#### V.2 Função Densidade de Probabilidade de Variável Contínua

A função densidade de probabilidade  $f_x(x)$  de uma variável contínua  $x$ , é definida por:

$$f_x(x) = \frac{dP_x(x)}{dx} \quad (V.1)$$

onde  $P_x(x)$  é a função que representa a probabilidade de ocorrência associada a cada valor de  $x$ .

A probabilidade de que se obtenha um valor  $x$  dentro do intervalo  $[x_1, x_2]$  é dada por:

$$P(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f_x(x) \cdot dx \quad (V.2)$$

### V.3 Índices Estatísticos de uma Distribuição Empírica: Média, Variância e Desvio Padrão

A estimativa de índices estatísticos relativos à distribuição da população, representada pela função densidade de probabilidade da variável  $x$  ( $f_x(x)$ ), pode ser obtida a partir de uma distribuição empírica, definida com base em uma amostra de  $N$  valores  $(x_i)_{i=1,2,\dots,N}$ .

Em engenharia civil o termo amostra se refere a um único item, tal como uma amostra de solo. Em estatística o termo amostra significa um conjunto de resultados ou valores. Em geral,  $N$  amostras de solo, por exemplo, conduzem a uma amostra estatística de  $N$  valores da variável medida.

O valor médio  $\bar{x}$ , obtido a partir de uma distribuição empírica de  $N$  valores de  $x$ , e que melhor representa o valor verdadeiro da média de toda a população de valores de  $x$  ( $x_m$ ) é dado por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (V.3)$$

A variância  $(S_x)^2$  da distribuição empírica ou amostral de  $x$  representa uma estimativa da variância verdadeira da população  $(\sigma_x)^2$  e é dada pela expressão:

$$(S_x)^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{(N-1)} \quad (V.4)$$

Sendo que o desvio padrão ( $S_x$  ou  $\sigma_x$ ) é dado pela raiz quadrada da variância.

Freqüentemente tem-se que comparar o grau de dispersão de duas variáveis expressas em unidades diferentes. Isso é feito por meio do coeficiente de variação ( $\Omega$ ), que é uma relação adimensional obtida dividindo-se o desvio padrão da variável por sua média.

#### V.4 Momentos Estatísticos de uma Distribuição Empírica e Suas Relações com Índices Estatísticos

Para  $N$  valores assumidos por uma variável  $(x_i)_{i=1,2,\dots,N}$  em uma medida, o momento de ordem  $r$  da distribuição em relação a  $x=A$ , cuja notação é  $E[(x-A)^r]$  é definido por:

$$E[(x-A)^r] = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - A)^r}{N} \quad (V.5)$$

A partir de (V.5) tem-se que o primeiro momento ( $r=1$ ) de uma distribuição empírica de  $N$  valores de  $x$  em relação à

origem ( $A=0$ ) é:

$$E(x) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (V.6)$$

onde:

$E(x)$  é o valor esperado de  $x$  ou esperança de  $x$ .

Comparando-se (V.6) com (V.3) verifica-se que:

$$E(x) = \bar{x} \quad (V.7)$$

A partir de (V.5) tem-se que o segundo momento ( $r=2$ ) de uma distribuição empírica de  $N$  valores de  $x$  em relação à média da distribuição ( $A=\bar{x}$ ) é:

$$E[(x-\bar{x})^2] = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (V.8)$$

Comparando-se (V.8) com (V.4) e admitindo-se um grande número de observações na medida ( $N \geq 30$ ), conclui-se que:

$$E[(x-\bar{x})^2] \approx (S_x)^2 \quad (V.9)$$

## V.5 Distribuição Normal

A curva contínua da figura (V.1) representa a função densidade de probabilidade de uma distribuição normal de valores de uma variável aleatória  $x$ , a qual pode ser expressa por:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x} \cdot e^{-\frac{(x-x_m)^2}{2(\sigma_x)^2}} \quad (V.10)$$

onde:

$f_x(x)$  é a função densidade de probabilidade da variável  $x$ ,

$x_m$  é o valor verdadeiro da média da distribuição,

$\sigma_x$  é o desvio padrão da distribuição.

## V.6 Inferências Estatísticas em Distribuições Normais

A inferência estatística tem por objetivo permitir que se deduzam informações relativas a uma população utilizando-se as informações obtidas de amostras dela extraídas.

### V.6.1 Distribuição Amostral da Média

Suponha-se que o valor médio obtido para uma distribuição empírica de uma variável aleatória  $x$ , para uma amostra de  $N$  elementos, seja igual a  $\bar{x}$ . Utilizando-se outras amostras extraídas da mesma população, seriam obtidos diferentes va-



lores para a média  $\bar{x}$ .

Segundo SPIEGEL (1984) os valores de  $\bar{x}$  obtidos em uma série de amostras extraídas da mesma população normalmente distribuída, apresentam uma distribuição estatística, também normal, com as seguintes propriedades:

$$E(\bar{x}) = x_m \quad (V.11)$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma_x / \sqrt{N} \quad (V.12)$$

onde:

$E(\bar{x})$  é o valor esperado de  $\bar{x}$ ,

$x_m$  é o valor verdadeiro da média da distribuição dos valores de  $x$ , ou valor médio populacional,

$\sigma_{\bar{x}}$  é o desvio padrão da distribuição das médias amostrais,

$\sigma_x$  é o desvio padrão populacional da distribuição dos valores individuais da variável  $x$ , estimado por  $S_x$ ,

$N$  é o número de elementos por amostra.

Assim, se dispomos de apenas uma amostra, pode-se dizer que o valor médio populacional  $x_m$  correspondente à grandeza  $x$  estudada está compreendido, com um nível de confiança  $c$ , no intervalo de confiança limitado por:

$$(X_m)_{\max} = \bar{x} + Z_c \cdot \sigma_x \quad (V.13)$$

$$(X_m)_{\min} = \bar{x} - Z_c \cdot \sigma_x \quad (V.14)$$

onde  $Z_c$  é a abcissa da curva normal reduzida ( $Z_m=0$ ,  $\sigma_x=1$ ), para um nível de confiança  $c$ , considerando-se distribuição normal para as médias.

### V.6.2 Distribuição Amostral dos Desvios Padrão

Adotando-se o raciocínio anterior para a distribuição dos desvios padrão amostrais  $S_x$  de uma população normalmente distribuída, tem-se para a distribuição amostral do desvio padrão as seguintes propriedades:

$$E(S_x) = \sigma_x \quad (V.15)$$

$$\sigma_{S_x} = \sigma_x / \sqrt{2N} \quad (V.16)$$

Analogamente ao item V.6.1, em se dispendo de apenas uma amostra, pode-se dizer que o desvio padrão populacional  $\sigma_x$  está compreendido, com um nível de confiança  $c$ , no intervalo limitado por:

$$(S_x)_{\min}^{\max} = S_x \pm Z_c \frac{\sigma_x}{\sqrt{2N}} \quad (V.17)$$

Em geral o desvio padrão  $\sigma_x$  da população é desconhecido, podendo ser adotada sua estimativa amostral  $S_x$  na obtenção de estimativas de valor médio e desvio padrão populacional.

### V.6.3 Intervalos de Confiança da Resposta Individual e da Média

Os intervalos de confiança podem ter duas interpretações distintas, a saber:

- Intervalos que contêm os resultados pontuais (individuais) ou intervalos de confiança da resposta individual.
- Intervalos que contêm os valores médios (globais) ou intervalos de confiança da média.

O intervalo de confiança para os possíveis valores de  $x$ , correspondente a um nível de confiança  $c$ , com os valores populacionais  $x_m$  e  $\sigma_x$  estimados através de suas distribuições, admitidas como normais, constitui o intervalo de confiança da resposta individual, que pode ser definido pelos seguintes limites:

$$x_{\max} = (x_m)_{\max} + Z_c \cdot (\sigma_x)_{\max} \quad (V.18)$$

$$x_{\min} = (x_m)_{\min} - Z_c \cdot (\sigma_x)_{\max} \quad (V.19)$$

onde os valores de  $(x_m)_{\max}$ ,  $(x_m)_{\min}$  e  $(\sigma_x)_{\max}$ , já foram definidos anteriormente, respectivamente pelas expressões (V.13), (V.14) e (V.17).

Os limites para o intervalo de confiança dos valores médios de  $x$  para um nível de confiança  $c$  são dados pelas expressões (V.13) e (V.14).

Para melhor compreensão dos conceitos apresentados, observe-se a figura V.2.

Os limites de confiança da resposta individual podem ser interpretados como uma quantificação da variabilidade pontual da grandeza, enquanto os limites de confiança da média podem ser considerados como uma aproximação da sua variabilidade espacial (ver ANDRADE LIMA, 1991).

## V.7 Análise de Regressão Linear

Dadas duas variáveis  $x$  e  $y$ , que mantenham entre si uma relação estatística, tal que  $y$  é uma variável dependente de  $x$ , a reta de regressão de  $y$  em  $x$  é a reta que melhor estima o valor de  $y(x)$ .

Em uma relação estatística observa-se uma tendência da variável dependente  $y$  variar sistematicamente com  $x$ , existe, porém, uma dispersão nos resultados das observações dos valores de  $y$  em torno da curva que reflete essa tendência.

O modelo de regressão considera que cada observação  $y_i$  da variável dependente,  $y$ , é composta por duas parcelas. A primeira reflete a parcela de  $y$  que mantém uma relação funcional com  $x$  e é denominada parcela de regressão. A segunda, conhecida como componente randômica ou erro, reflete a dispersão dos valores de  $y(x)$ .

Supondo-se uma relação linear pré-estabelecida entre  $x$  e  $y$  dada pela expressão:

$$y = a + x.b \quad (V.20)$$

o modelo de regressão é traduzido pela seguinte expressão:

$$y_1 = a + x_1.b + \epsilon_1 \quad (V.21)$$

onde

$(a + x_1.b)$  é a parcela de regressão,

$\epsilon_1$  é a componente randômica ou erro, suposta normalmente distribuída, com média  $E(\epsilon_1)=0$  e com variância  $\sigma^2$  constante para todos os níveis de  $x$ .

A figura (V.3) apresenta a relação estatística idealizada entre  $x$  e  $y$ .

#### V.7.1 Função de Regressão

A função de regressão representa a relação funcional entre os valores esperados para a variável dependente  $y$  e valores conhecidos de  $x$ . Para uma observação  $i$ , esta relação é dada com base em (V.21) pela seguinte equação:

$$E(y_1) = y_{1m} = E(a_m + x_1.b_m + \epsilon_1) \quad (V.22)$$

onde

$E(y_1)$  é o valor esperado para  $y_1$  em uma observação  $i$ ,

$y_{1m}$  é o valor verdadeiro da média da distribuição de  $y_1$ , correspondente a  $x=x_1$ ,

$x_1$  é o valor de  $x$  na observação  $i$ ,

$a_m$  e  $b_m$  são os coeficientes médios da equação que define a função de regressão,

$\epsilon_1$  é o desvio na observação  $i$ , entre o valor observado e o esperado de  $y_1$ .

Admitindo-se que  $a_m$  e  $b_m$  são parâmetros constantes, embora desconhecidos, que o valor  $x_1$  da variável independente  $x$  em cada observação é conhecido e que  $E(\epsilon_1)=0$ , tem-se que:

$$y_{1m} = a_m + x_1.b_m \quad (V.23)$$

Portanto para cada valor de  $x_1$ , o valor correspondente de  $y_1$  é uma variável randômica, normalmente distribuída, cuja média é dada pela equação (V.23), que exprime a função de regressão, e cuja variância  $\sigma^2$  é igual à variância dos erros  $\epsilon_1$ , independente do valor de  $x_1$ .

A função de regressão, ou relação funcional entre o valor esperado de  $y$ , denominado  $y_m$ , e o valor de  $x$  é:

$$y_m = a_m + x.b_m \quad (V.24)$$

### V.7.2 Coeficientes da Função de Regressão

A função de regressão, dada pela equação (V.24) pode ser estimada por:

$$\hat{y} = \hat{a} + x.\hat{b} \quad (V.25)$$

onde  $\hat{a}$  e  $\hat{b}$  são os valores médios adotados para as distribuições de  $a$  e  $b$ , obtidos a partir das observações  $x_1$  e  $y_1$ , através do princípio da máxima probabilidade, sendo as melhores estimativas para os regressores  $a_m$  e  $b_m$ .

Os coeficientes  $a$  e  $b$  são, portanto, estimados pelos valores de  $\hat{a}$  e  $\hat{b}$ , definidos a partir da aplicação do princípio da máxima probabilidade, de forma a tornar máxima a probabilidade de que se tenha obtido o conjunto de pares  $x$  e  $y$  de que se dispõe, pelas seguintes expressões:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (V.26)$$

$$\hat{b} = \frac{N \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (V.27)$$

### V.7.3 Estimativa Pontual da Variância da Distribuição dos Desvios da Variável y

A variância da variável aleatória y, dependente de x, é avaliada através de uma média quadrática das diferenças dos valores observados  $y_1$  em relação à reta média de regressão. A média quadrática dos erros, denominada MSE (Mean-Square-Error) é a melhor estimativa para a variância de y em torno da reta de regressão ( $\sigma^2$ ), sendo dada pela expressão:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-2} = \sigma^2 \quad (V.28)$$

### V.7.4 Inferências Estatísticas na Regressão Linear Simples

#### V.7.4.1 Distribuição Amostral de $\hat{y}$

A estimativa  $\hat{y}$ , para a média da distribuição dos valores de y, correspondente a um dado valor x, dada pela equação (V.22), varia em repetidas amostras. A distribuição amostral de  $\hat{y}$ , função do valor de x considerado, referente aos diferentes valores de  $\hat{y}$  que poderão ser obtidos por regressão linear, apresenta as seguintes propriedades:

$$E(\hat{y}) = a_m + b_m \cdot x = y_m \quad (V.29)$$

$$(\sigma_{\hat{y}})^2 = \sigma^2 \cdot \left[ \frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right] \quad (V.30)$$



sendo:

$\hat{y}$  o valor estimado para a média amostral da distribuição dos valores de  $y$  da função de regressão correspondente a um dado valor de  $x$ ,

$E(\hat{y})$  o valor esperado para a estimativa  $\hat{y}$ ,

$y_m$  o valor verdadeiro da média da distribuição dos valores de  $y$  correspondentes a um dado valor de  $x$ ,

$a_m$  e  $b_m$ , respectivamente os valores médios verdadeiros dos coeficientes  $a$  e  $b$  da função de regressão, que podem ser estimados por  $\hat{a}$  e  $\hat{b}$  obtidos em uma amostra,

$x$  o valor da variável independente considerada, em função da qual se determina  $(\sigma_y)^2$ ,

$(\sigma_y)^2$  a variância da distribuição dos valores de  $\hat{y}$ ,

$\sigma^2$  a variância dos desvios de  $y_i$  em torno da reta de regressão, que pode ser estimada por MSE,

$N$  o número de dados da amostra utilizada,

$x_i$  cada um dos valores de  $x$  na amostra utilizada,

$\bar{x}$  a média aritmética dos valores de  $x_i$  da amostra utilizada, aplicando-se à variável  $x$  a equação (V.3).

A partir dos parâmetros relativos à distribuição de  $\hat{y}(x)$  e através de procedimento descrito no item (V.6), tem-se que o valor da ordenada  $y_m(x)$  da reta de regressão para um dado valor de  $x$ , sendo que  $y_m(x)$  é a média populacional dos valores de  $y(x)$ , encontra-se com nível de confiança  $c$ , dentro do intervalo (intervalo de confiança dos valores médios) limitado por:

$$y_m(x)_{\max} = \hat{y}(x) \pm Z_c \cdot \sigma_y \quad (V.31)$$

$\min$

Considerando-se que cada valor  $\hat{y}(x)$  é a média amostral da distribuição de  $y(x)$  para cada nível  $x$ , e que os valores individuais de  $y(x)$  se distribuem em torno da reta média populacional  $y_m(x)$  segundo uma distribuição normal com desvio padrão estimado em  $\sqrt{MSE}$ , demonstra-se que um valor individual de  $y(x)$ , correspondente a um dado valor de  $x$ , encontra-se com nível de confiança igual a  $c$ , dentro do intervalo (intervalo de confiança da resposta individual) limitado por:

$$y(x)_{\max} = \hat{y}(x) \pm Z_c \cdot (\sigma_y + \sqrt{MSE}) \quad (V.32)$$

$\min$

A figura (V.4) mostra os conceitos de intervalo de confiança para o valor médio  $y_m(x)$  e para uma resposta individual  $y(x)$ , correspondente a um dado nível da variável independente  $x$ .

#### V.7.4.2 Distribuições Amostrais dos Coeficientes a e b

As estimativas  $\hat{a}$  e  $\hat{b}$  para os valores médios dos coeficientes a e b da reta de regressão assumem vários valores diferentes se várias amostras forem utilizadas na sua determinação.

A distribuição de a, considerando-se uma série de amostras de N elementos, apresenta as seguintes propriedades:

$$E(a) = \hat{a} \quad (V.33)$$

$$(\sigma_a)^2 = (\sigma_{\hat{a}})^2 = \text{MSE} \cdot \left[ \frac{1}{N} + \frac{x^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right] \quad (V.34)$$

onde:

$(\sigma_a)^2$  é a variância da distribuição de  $\hat{a}$ , considerando-se várias amostras.

Note-se que a equação (V.34) é obtida diretamente da equação (V.30) para  $x=0$ , pois coincide com  $y(x=0)$ .

A distribuição amostral de b, considerando-se uma série de amostras com N elementos apresenta as seguintes propriedades:

$$E(b) = \hat{b} \quad (V.35)$$

$$(\sigma_b)^2 = (\sigma_{\hat{b}})^2 = \frac{\text{MSE}}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{V.36})$$

onde:

$(\sigma_b)^2$  é a variância da distribuição de  $b$ , considerando-se várias amostras.

#### V.8 Definição da Distribuição Probabilística de uma Função de Variáveis Randômicas pelo Método da Expansão em Série de Taylor:

O Método da Expansão em Série de Taylor é utilizado neste trabalho na obtenção das propriedades das distribuições de  $S$ ,  $c_v$  e  $c_h$  a partir das propriedades das distribuições de  $\beta_0$  e  $\beta_1$ .

Este método prevê a expansão em série de Taylor de uma função  $y(x_1)_{i=1, \dots, n}$  em torno dos valores médios de  $x_1$  e a obtenção dos momentos estatísticos de  $y$  a partir das definições desses momentos, aplicadas à série na qual  $y$  foi expandida.

Para uma função  $y$  de  $N$  variáveis randômicas  $x_1$  torna-se possível obter os momentos da função  $y$ , expressos como funções dos momentos das distribuições das variáveis independentes  $x_1$  da função  $y(x_1)$  e de suas derivadas aplicadas aos valores médios de  $x_1$ .

Assim, sabendo-se que o primeiro momento de uma distribuição empírica em relação à origem é numericamente igual à média da distribuição e que o segundo momento de uma distribuição empírica em relação à média da mesma é numericamente igual à variância da distribuição, utilizando-se apenas o primeiro termo de cada equação gerada pela expansão em série de Taylor de uma função  $y(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$  (ver ANDRADE LIMA, 1991) tem-se:

$$\bar{y} = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_N) \quad (V.37)$$

$$(\sigma_{\bar{y}})^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \bar{x}_i \right)^2 \cdot (\sigma_{x_i})^2 \right] \quad (V.38)$$

onde

$\bar{y}$  é o valor médio da distribuição de  $y(x_1)$ ,

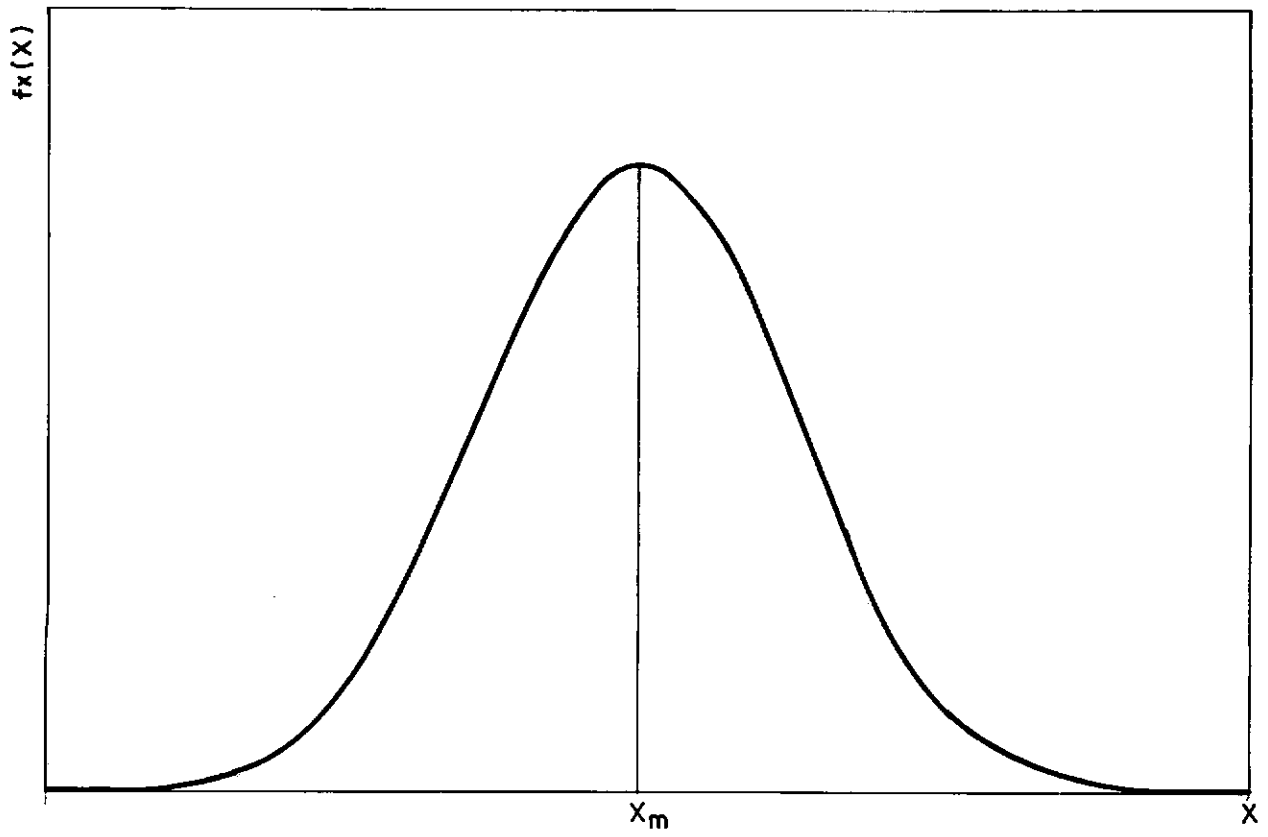
$(\sigma_y)^2$  é a variância da distribuição de  $y(x_1)$ , igual ao quadrado do desvio-padrão  $(\sigma_y)$ ,

$\bar{x}_1$  é o valor médio da distribuição da variável  $x_1$ ,

$(\sigma_{x_1})^2$  é a variância da distribuição da variável  $x_1$ , igual ao quadrado do desvio padrão  $(\sigma_{x_1})$ ,

$|\partial y / \partial x_i|_{\bar{x}_i}$  é a derivada parcial da função  $y(x_1)$  em relação a  $x_i$  computada em  $x_i = \bar{x}_i$ .

Para tanto,  $y(x_1)$  deve ser uma função contínua e derivável em relação às variáveis  $x_1$ .



$$f_X(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_X} e^{\frac{-(X-X_m)^2}{2\sigma_X^2}}$$

Figura V.1 - Função densidade de probabilidade normal de variável  $X$ .

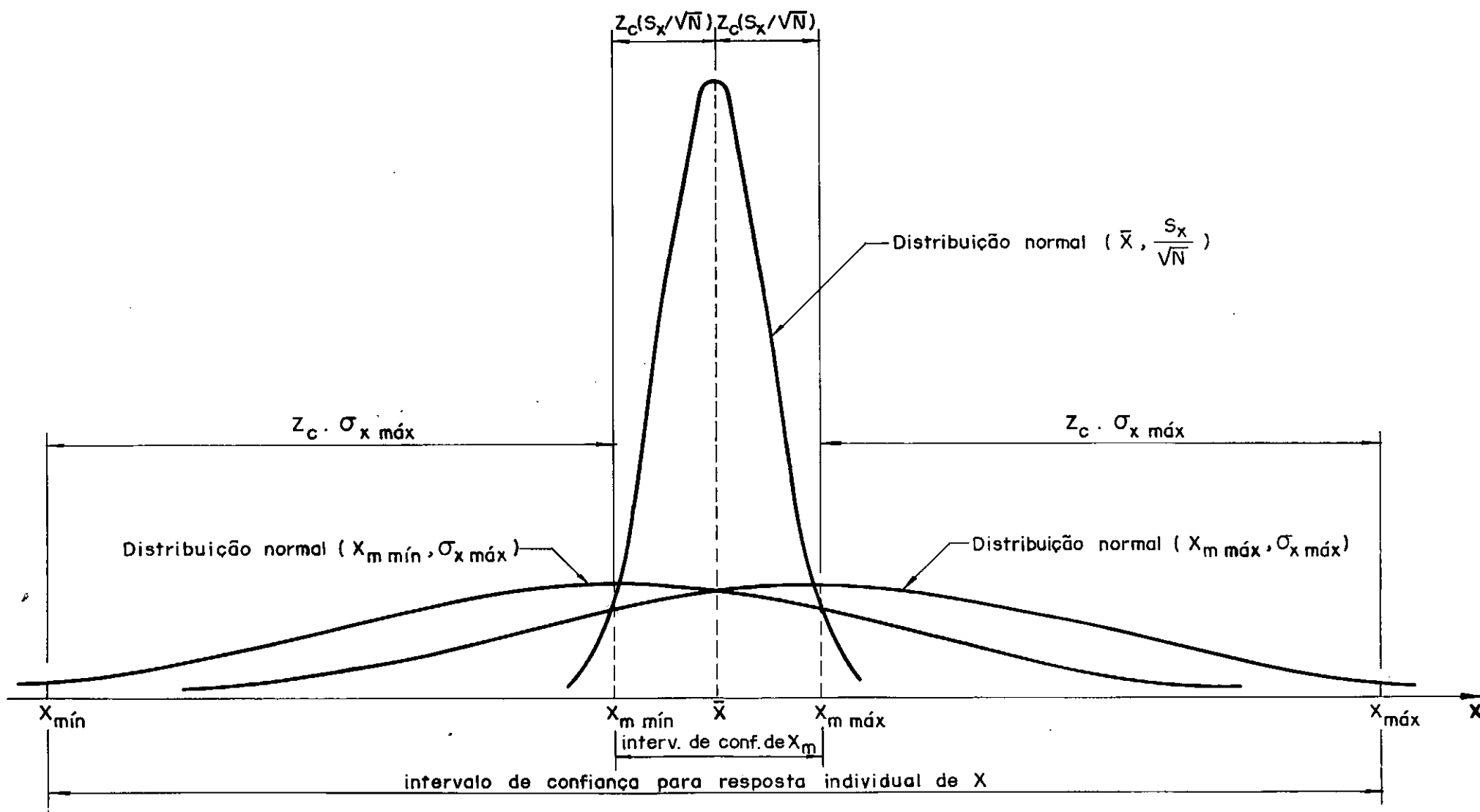


Figura V.2 - Construção para determinação dos intervalos de confiança da média populacional e da resposta individual de uma variável  $X$ , a partir de dados amostrais (APUD ANDRADE LIMA, 1991).

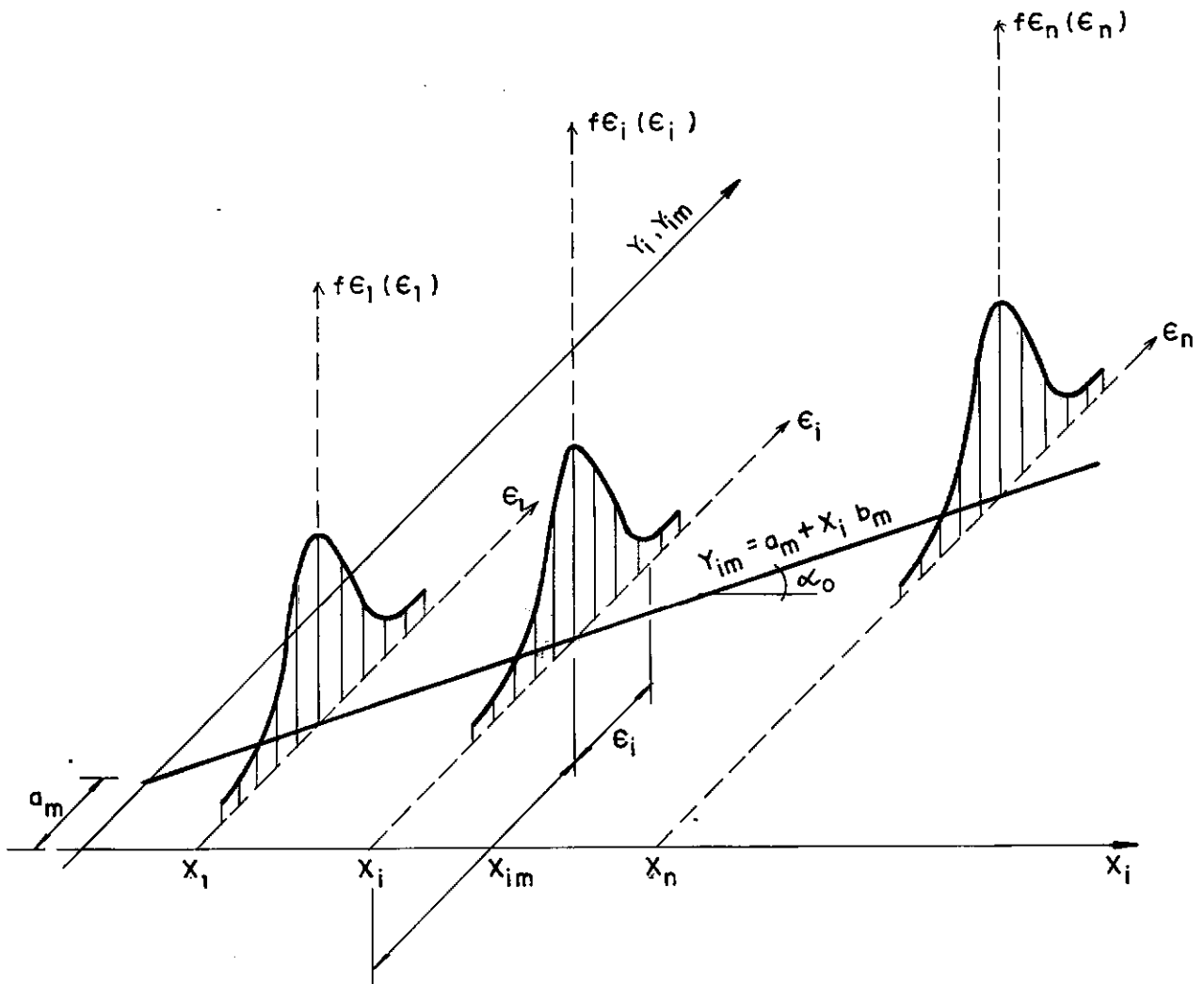


Figura V.3 - Relação estatística entre as variáveis  $X$  e  $Y$ , no modelo de regressão linear (APUD ANDRADE LIMA, 1991).



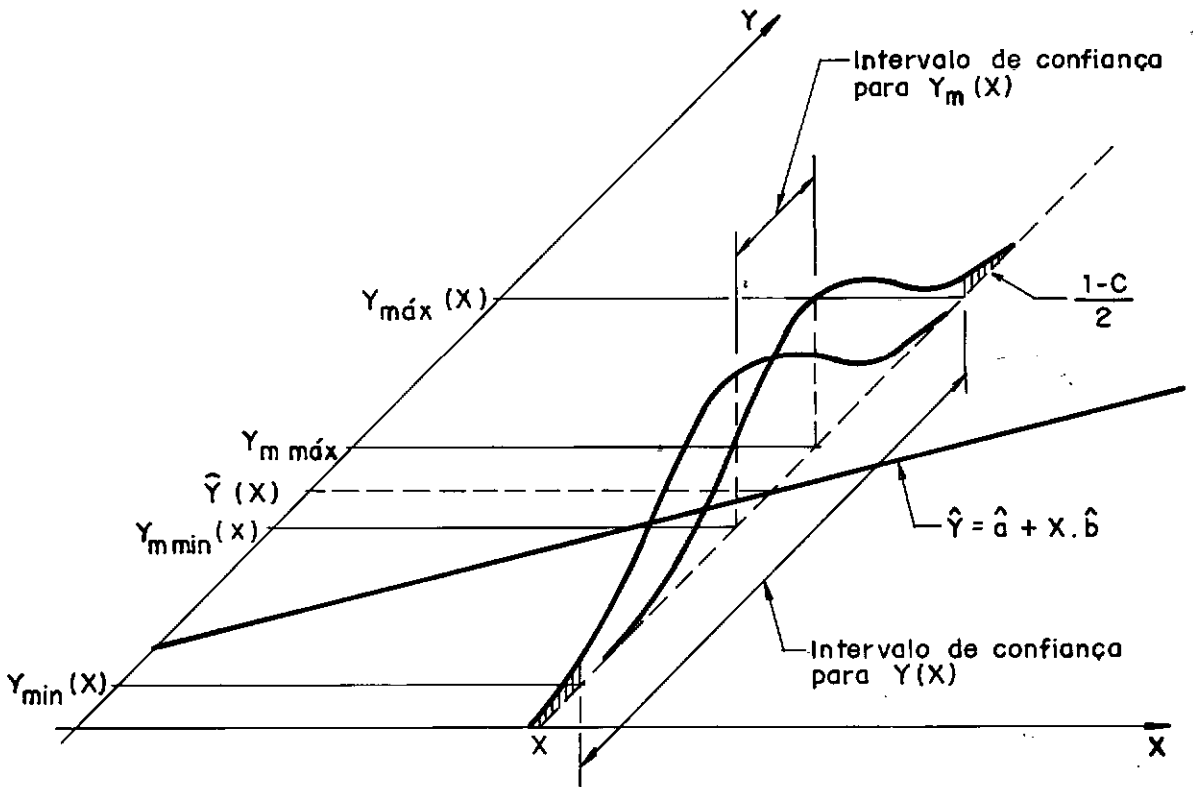


Figura V.4 - Conceituação dos intervalos de confiança para a ordenada da reta de regressão  $Y_m(X)$  e para a resposta individual  $Y(X)$  para um valor de  $X$ , correspondentes ao nível de confiança  $C$  (APUD ANDRADE LIMA, 1991).

## CAPITULO VI

### Aplicação do Método de Asaoka Modificado

#### VI.1 Introdução

O presente capítulo apresenta a aplicação do Método de Asaoka Modificado, descrito no capítulo III, aos resultados das medições de recalques obtidos através da instrumentação do Aterro Experimental II do Sarapuí, com o objetivo de se obterem estimativas acerca dos valores dos recalques finais por adensamento e dos coeficientes de adensamento vertical e horizontal.

Nesta análise procurou-se observar o comportamento médio do depósito argiloso, ao longo do eixo longitudinal do aterro, em relação aos recalques devidos ao adensamento.

Foram analisados os dados obtidos pelas placas de recalque instaladas na base do aterro e posicionadas ao longo do seu eixo longitudinal ou nas proximidades deste. Ficaram excluídas da análise as placas R1, R5, R6, R7 e R16 por estarem localizadas próximas aos bordos do aterro. Ficaram excluídas também da análise as placas R10, por se localizarem no limite entre duas seções consecutivas.

Existe uma parcela de erro embutida dentro dos valores de recalques medidos, referente aos valores de recalques imediatos ou não drenados. Devido ao fato de que os valores dos recalques imediatos calculados por TERRA (1988), com

base na Teoria da Elasticidade, são pouco significativos em relação aos valores de recalques por adensamento, os valores de recalques não drenados não foram levados em consideração nesta análise.

Na determinação dos coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  das retas de Asaoka é dado um tratamento probabilístico aos dados obtidos nas medições de recalques, utilizando-se os conceitos apresentados no capítulo V.

A análise é feita apenas para a 2ª e 3ª etapas de carregamento em razão de que perturbações nas leituras iniciais na 1ª etapa não justificam sua análise pelo Método de Asaoka.

## VI.2 Descrição do Problema e Considerações

Trata-se de uma camada de argila mole, submetida ao carregamento provocado pela construção do Aterro II, por etapas, onde é permitida a drenagem em seu topo e em sua base (drenagem dupla) ao longo de todo o aterro. Com a execução dos drenos verticais, espera-se ainda a ocorrência de um processo de drenagem radial (horizontal) simultâneo para as cinco seções centrais do aterro (B, C, D, E e F).

O nível d'água é admitido como coincidente com o nível do terreno durante todo o processo de adensamento, sendo esta consideração respaldada por medidores de nível d'água instalados fora do aterro durante todo o período analisado, segundo TERRA (1988).

### VI.3 Dados Necessários

#### (a) Parâmetros referentes à camada argilosa e drenos

Na tabela VI.1 a seguir são apresentados, para cada seção, os valores dos diâmetros de influência dos drenos ( $d_e$ ), os valores das funções  $F(n)$  e os valores das alturas de drenagem ( $H_d$ ).

TABELA VI.1

SEÇÃO	$H_d$ (cm)		$F(n)$	$d_e$ (cm)
	2ª ETAPA	3ª ETAPA		
A	514	-	-	-
B	516	471	1,25	282,2
C	515	470	1,25	282,2
D	513	455	1,25	282,2
E	508	456	2,90	191,8
F	495	442	2,40	225,6
G	441	404	-	-

Os diâmetros de influência ( $d_e$ ) foram calculados para malha quadrangular pela equação (II.18) e as funções  $F(n)$  pela equação (II.24). Os valores dos espaçamentos entre drenos ( $s$ ) e diâmetros efetivos dos drenos de areia ou diâmetros

efetivos equivalentes dos drenos pré-fabricados ( $d_w$ ), necessários para o cálculo dos parâmetros  $d_e$  e  $F(n)$ , são aqueles apresentados na tabela IV.2.

O valores das alturas de drenagem ( $H_d$ ) foram calculados para cada seção descontando-se da espessura  $H$  inicial da camada o valor do recalque médio verificado nas placas de recalque no início de cada etapa, dividindo-se o resultado por dois (drenagem dupla).

#### **(b) Leituras de recalque**

Os dados provenientes da instrumentação de campo estão reunidos em arquivo ao qual se tem acesso através do programa "Sarapui2" implantado em microcomputador no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

As figuras VI.1 a VI.7 mostram as curvas Recalque x Tempo obtidas a partir das leituras de recalques realizadas nas placas de recalque incluídas nesta análise em cada seção instrumentada.

Com as informações existentes nos arquivos do laboratório de Geotecnia da COPPE, não foi possível calcular os recalques para as leituras realizadas após 23/01/87, com exceção das placas da seção E e das placas centrais R3 das demais seções, para as quais se têm as informações necessárias até a última leitura, efetuada em 27/12/89, sendo esta a 5ª leitura realizada após 23/01/87.

#### VI.4 Construção Gráfica de Asaoka

De posse das leituras de recalque realizadas ao longo do tempo nas placas, partiu-se para a definição dos recalques nos tempos  $t_j = j \cdot \Delta t$ , admitindo-se como datas iniciais para cada etapa, aquelas apresentadas na tabela IV.1.

A análise foi realizada para os intervalos de tempo  $\Delta t = 30$  dias e  $\Delta t = 60$  dias, a fim de se compararem os resultados obtidos em cada análise, verificando-se a influência do intervalo de tempo para o problema em questão.

##### VI.4.1 Obtenção dos Recalques nos Tempos $t_j = j \cdot \Delta t$

A princípio, optou-se por ajustar aos pontos do gráfico Recalque x Tempo, para cada placa e em cada etapa, uma curva, obtendo-se (com a utilização do programa GRAPHER) equações matemáticas relacionando os recalques em função do tempo. Assim, a obtenção dos recalques nos tempos desejados foi feita utilizando-se os tempos  $t_j$  como variáveis nestas equações.

Verificou-se, porém, ser a reta de ASAOKA extremamente sensível a qualquer ajuste nas curvas Recalque x Tempo. Isto é, os valores de  $\beta_0$  e principalmente os de  $\beta_1$  modificam-se significativamente para cada tentativa de se ajustar uma equação à curva de recalque em função do tempo. Por esta razão optou-se por um ajuste na própria reta de Asaoka e não na curva Recalque x Tempo.

Assim, as curvas Recalque x Tempo utilizadas foram aquelas construídas ligando-se os pontos através de segmentos de reta (tais como as apresentadas nas figuras VI.1 a VI.7). Desta forma, cada valor de recalque foi obtido por interpolação linear entre duas medidas consecutivas cujo espaço de tempo contivesse o tempo  $t_j = j \cdot \Delta t$  desejado.

#### VI.4.2 Determinação dos Valores dos Coeficientes $\beta_0$ e $\beta_1$ das Retas de Asaoka

De posse dos valores dos recalques nos tempos  $t_j = j \cdot \Delta t$  ( $\Delta t = 30$  dias e  $\Delta t = 60$  dias), para cada placa foi construído um gráfico de ASAOKA de acordo com a metodologia apresentada no capítulo III deste trabalho. Em cada gráfico foi feita uma análise em separado para as retas correspondentes a cada etapa de carregamento (2ª e 3ª etapas). Foram construídos gráficos para  $\Delta t = 30$  dias e  $\Delta t = 60$  dias, realizando-se duas análises pelo Método de Asaoka Modificado.

Os gráficos foram executados pelo programa GRAPHER e submetidos a uma análise visual afim de se identificarem as retas correspondentes a cada etapa de carregamento, bem como possíveis mudanças de inclinação nas retas de ASAOKA.

Observando-se os gráficos, apresentados nas figuras VI.8 a VI.60, verifica-se a ocorrência de uma leve mudança (aumento) de inclinação ao longo de todo o gráfico, que se acentua com a evolução dos recalques.

Nota-se ainda que no início de cada "reta", correspondente a cada etapa de carregamento, em geral, há uma mudança de inclinação, não brusca porém significativa, tendo sido esse fato também observado por MAGNAN E MIRUSSENS (1980) em análises de curvas Recalque x Tempo teóricas pelo método de ASAOKA. A inclinação inicial é bem menor que a existente ao longo do restante do gráfico, podendo levar a erros consideráveis na determinação dos coeficientes de adensamento, se incluída na análise. Assim, decidiu-se não levar em consideração a inclinação inicial, não se incluindo, portanto, os pontos iniciais em cada etapa, nas análises realizadas.

Para a segunda etapa o carregamento foi aplicado de forma gradual, o que levou a perturbações nas curvas Recalque x Tempo medidas. Os pontos da reta de Asaoka referentes à ocasião anterior ao término da aplicação do carregamento foram excluídos da análise com a utilização do procedimento acima descrito.

Utilizando-se o programa GRAPHER, ajustaram-se retas aos pontos considerados na análise, obtendo-se as equações das mesmas e conseqüentemente os valores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , respectivamente coeficientes linear e angular das retas de Asaoka.

Cabe ressaltar que a origem dos eixos cartesianos é a mesma para a 2ª e 3ª etapas de carregamento, para efeito de determinação de  $\beta_0$ .

As tabelas VI.2 e VI.3, a seguir, apresentam os valores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  assim obtidos.



TABELA VI.2 - Valores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  -  $\Delta t = 30$  dias

SEÇÃO	PLACA	SEGUNDA ETAPA		TERCEIRA ETAPA	
		$\beta_0$ (mm)	$\beta_1$	$\beta_0$ (mm)	$\beta_1$
A	R2	47,87	0,9344	-	-
	R3	42,29	0,9453	-	-
	R4	44,49	0,9390	-	-
	R11	43,37	0,9474	-	-
	R12	46,24	0,9368	-	-
	R13	44,73	0,9393	-	-
	R14	45,41	0,9483	-	-
	R15	51,01	0,9418	-	-
B	R2	44,18	0,9504	103,59	0,9373
	R3	47,91	0,9579	149,09	0,9267
	R4	61,11	0,9417	162,05	0,9251
	R11	33,30	0,9731	101,66	0,9389
	R12	39,10	0,9712	156,04	0,9248
	R13	46,33	0,9538	(*)	(*)
	R14	48,98	0,9572	163,83	0,9170
	R15	39,70	0,9655	143,17	0,9256
C	R2	74,33	0,9238	(*)	(*)
	R3	57,45	0,9397	172,16	0,9128
	R4	55,70	0,9363	(*)	(*)
	R11	43,78	0,9599	145,53	0,9317
	R12	53,17	0,9456	168,31	0,9173
	R13	62,29	0,9362	177,58	0,9121
	R14	69,29	0,9398	201,27	0,9054
D	R2	118,51	0,8916	142,31	0,9255
	R3	156,38	0,8835	239,41	0,8976
	R4	107,05	0,9051	192,62	0,9074
	R11	105,65	0,9047	212,65	0,8984
	R12	133,59	0,8945	236,49	0,8957
	R13	121,14	0,9098	233,26	0,9028
	R14	107,93	0,9008	202,89	0,9127

(continua)

(\*) Placas danificadas

**TABELA VI.2 - Valores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  -  $\Delta t = 30$  dias**  
(continuação)

SEÇÃO	PLACA	SEGUNDA ETAPA		TERCEIRA ETAPA	
		$\beta_0$ (mm)	$\beta_1$	$\beta_0$ (mm)	$\beta_1$
E	R2	56,96	0,9380	98,33	0,9380
	R3	57,20	0,9248	(*)	(*)
	R4	56,56	0,9416	128,75	0,9276
	R11	44,15	0,9650	155,17	0,9233
	R12	46,50	0,9561	146,24	0,9244
	R13	60,59	0,9407	161,89	0,9176
	R14	57,94	0,9444	(*)	(*)
F	R2	72,21	0,9319	134,12	0,9216
	R3	61,69	0,9402	159,15	0,9165
	R4	70,83	0,9311	134,80	0,9269
	R11	63,51	0,9430	144,30	0,9299
	R12	69,63	0,9394	154,24	0,9282
	R13	62,75	0,9376	151,78	0,9200
	R14	63,07	0,9341	135,22	0,9292
	R15	67,59	0,9256	148,57	0,9218
G	R2	53,44	0,9391	148,96	0,8990
	R3	45,31	0,9424	68,13	0,9568
	R4	43,06	0,9459	111,52	0,9202
	R11	37,31	0,9569	124,36	0,9182
	R12	36,55	0,9553	118,35	0,9171
	R13	41,93	0,9517	112,89	0,9215
	R14	47,05	0,9519	133,26	0,9184
	R15	49,92	0,9528	69,64	0,9571

(\*) Placas danificadas

TABELA VI.3 - Valores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  -  $\Delta t = 60$  dias

SEÇÃO	PLACA	SEGUNDA ETAPA		TERCEIRA ETAPA	
		$\beta_0$ (mm)	$\beta_1$	$\beta_0$ (mm)	$\beta_1$
A	R2	91,99	0,8745	-	-
	R3	81,04	0,8966	-	-
	R4	84,87	0,8849	-	-
	R11	84,78	0,8971	-	-
	R12	90,81	0,8747	-	-
	R13	88,63	0,8784	-	-
	R14	88,62	0,8991	-	-
	R15	98,05	0,8886	-	-
B	R2	82,74	0,9098	207,21	0,8730
	R3	93,89	0,9174	288,64	0,8578
	R4	116,41	0,8895	323,41	0,8489
	R11	67,55	0,9438	185,78	0,8911
	R12	80,27	0,9386	301,66	0,8542
	R13	89,38	0,9313	(*)	(*)
	R14	94,34	0,9187	304,36	0,8463
	R15	77,25	0,9336	266,59	0,8619
C	R2	139,87	0,8579	(*)	(*)
	R3	111,39	0,8833	319,51	0,8396
	R4	106,37	0,8794	(*)	(*)
	R11	84,81	0,9234	282,43	0,8673
	R12	102,58	0,8956	321,73	0,8421
	R13	119,93	0,8777	335,88	0,8341
	R14	134,18	0,8833	382,81	0,8201
D	R2	220,83	0,7992	268,27	0,8601
	R3	270,43	0,8022	427,67	0,8193
	R4	207,85	0,8142	367,78	0,8232
	R11	200,94	0,8189	383,85	0,8185
	R12	253,44	0,7998	431,01	0,8114
	R13	229,24	0,8299	426,20	0,8238
	R14	207,66	0,8078	368,05	0,8436

(continua)

(\*) Placas danificadas

**TABELA VI.3 - Valores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  -  $\Delta t = 60$  dias**  
(continuação)

SEÇÃO	PLACA	SEGUNDA ETAPA		TERCEIRA ETAPA	
		$\beta_0$ (mm)	$\beta_1$	$\beta_0$ (mm)	$\beta_1$
E	R2	109,09	0,8820	181,57	0,8863
	R3	105,68	0,8981	(*)	(*)
	R4	109,07	0,8879	229,05	0,8731
	R11	86,93	0,9310	281,73	0,8625
	R12	90,67	0,9146	258,61	0,8687
	R13	117,45	0,8852	280,03	0,8602
	R14	112,36	0,8925	(*)	(*)
F	R2	139,13	0,8690	252,65	0,8530
	R3	120,30	0,8828	275,15	0,8598
	R4	129,22	0,8776	231,98	0,8782
	R11	121,63	0,8921	254,62	0,8800
	R12	133,14	0,8851	289,75	0,8661
	R13	120,72	0,8805	288,41	0,8485
	R14	129,68	0,8725	281,99	0,8490
	R15	129,68	0,8575	283,94	0,8507
G	R2	102,54	0,8836	289,50	0,8015
	R3	80,57	0,9017	132,62	0,9162
	R4	83,23	0,8958	250,86	0,8129
	R11	72,66	0,9163	239,28	0,8417
	R12	71,04	0,9134	236,36	0,8310
	R13	81,82	0,9057	207,67	0,8565
	R14	88,55	0,9108	241,29	0,8535
	R15	95,19	0,9109	131,33	0,9198

(\*) Placas danificadas

### VI.4.3 Aplicação de Tratamento Probabilístico

Em um enfoque determinístico tradicional, bastaria obter os valores médios de  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , calculados no sub-item anterior, utilizando-se estes valores para o cálculo dos coeficientes de adensamento e recalques finais.

As dúvidas e incertezas nas medições, além da grande sensibilidade do método, justificam a aplicação de um enfoque probabilístico ao problema, a fim de se obterem estimativas para as distribuições probabilísticas dos valores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  (admitidas como normais) e os respectivos intervalos de confiança.

Uma forma de se analisar o problema é o estabelecimento dos intervalos de confiança para as retas de Asaoka em cada seção, pela análise por regressão linear simples de todos os pontos obtidos para o conjunto de placas, por fase de carregamento, de acordo com o procedimento descrito no item V.7 deste trabalho.

Nesse caso, cada um dos pontos  $(S_{j-1}, S_j)$  obtidos na construção de Asaoka para cada placa individualmente é considerado um elemento da amostra formada por todos os pontos de todas as placas da seção em cada etapa de carregamento.

Aplicando-se este enfoque, para cada seção foi construído um gráfico de Asaoka por fase de carregamento, a partir dos pontos  $(S_{j-1}, S_j)$  definidos anteriormente para as construções de Asaoka para cada placa individualmente.

Assim, para cada seção por fase de carregamento, foi definida apenas uma reta média de Asaoka obtida por regressão linear realizada com os pontos  $(S_{j-1}, S_j)$  de todas as placas da seção, plotados em um mesmo gráfico de eixos cartesianos.

Os valores médios e os desvios padrão das distribuições de  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , bem como os intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de regressão de  $S_j$  em  $S_{j-1}$ , foram determinados conforme procedimento descrito no item V.7 deste trabalho.

Na aplicação dos conceitos de regressão linear simples ao problema estudado, considerou-se  $S_{j-1}$  como sendo a variável independente (variável x do item V.7) e  $S_j$  como sendo a variável dependente de  $S_{j-1}$  (variável y do item V.7). Os regressores da função de regressão estabelecida entre  $S_j$  e  $S_{j-1}$  são os coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  correspondentes, respectivamente, aos coeficientes a e b do item V.7.

As tabelas (VI.4) e (VI.5), a seguir, apresentam os valores médios ou esperados e desvios padrão para a distribuição dos valores médios de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  para cada seção por fase de carregamento, para as análises feitas com  $\Delta t = 30$  dias e 60 dias, calculados por regressão linear para os pontos de todas as placas em conjunto.

**TABELA VI.4 - Resultados Obtidos Pela Análise por Regressão Linear do Conjunto de Pontos das Construções de Asaoka Para Cada Seção -  $\Delta t = 30$  dias**

SEÇÃO	ETAPA	$E(\beta_0)$	$\sigma_{\beta_0}$	$E(\beta_1)$	$\sigma_{\beta_1}$
A	2a	39,29	1,47	0,9542	0,0028
B	2a	38,93	1,34	0,9704	0,0022
	3a	40,18	9,54	0,9971	0,0066
C	2a	49,44	2,41	0,9566	0,0040
	3a	144,15	9,82	0,9330	0,0060
D	2a	98,67	4,03	0,9262	0,0047
	3a	84,96	13,65	0,9747	0,0076
E	2a	53,70	1,18	0,9476	0,0021
	3a	80,04	8,28	0,9636	0,0054
F	2a	60,59	1,37	0,9447	0,0022
	3a	96,71	10,14	0,9573	0,0068
G	2a	27,53	1,42	0,9784	0,0024
	3a	71,83	8,41	0,9590	0,0071

**TABELA VI.5 - Resultados Obtidos Pela Análise por Regressão Linear do Conjunto de Pontos das Construções de Asaoka Para Cada Seção -  $\Delta t = 60$  dias**

SEÇÃO	ETAPA	$E(\beta_0)$	$\sigma_{\beta_0}$	$E(\beta_1)$	$\sigma_{\beta_1}$
A	2a	78,23	3,39	0,9079	0,0065
B	2a	74,01	3,22	0,9457	0,0054
	3a	66,09	25,13	1,0042	0,0177
C	2a	96,55	5,94	0,9153	0,0100
	3a	286,17	24,73	0,8656	0,0152
D	2a	192,20	9,17	0,8553	0,0108
	3a	146,71	31,87	0,9601	0,0179
E	2a	103,66	2,93	0,8995	0,0053
	3a	136,20	19,89	0,9408	0,0128
F	2a	116,32	3,36	0,8946	0,0054
	3a	174,79	27,06	0,9259	0,0183
G	2a	52,89	3,58	0,9594	0,0062
	3a	127,68	25,62	0,9302	0,0218



Os valores médios ou esperados de  $\beta_0$  ( $E(\beta_0)$ ) foram calculados com utilização das expressões (V.26) e (V.33).

Os valores médios ou esperados de  $\beta_1$  ( $E(\beta_1)$ ) foram calculados com utilização das expressões (V.27) e (V.35).

Os desvios padrão de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  ( $\sigma_{\beta_0}$  e  $\sigma_{\beta_1}$ ) foram calculados, respectivamente, utilizando-se as expressões (V.34) e (V.36).

As figuras (VI.61) a (VI.73) mostram, a título de ilustração, os gráficos de Asaoka resultantes da análise feita por regressão linear simples para  $\Delta t=60$  dias. Estão apresentados a reta média de Asaoka e os intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual, estabelecidos para um nível de confiança  $c=95\%$  ou  $c=0,95$  ( $Z_\alpha=1,96$ ), respectivamente pela utilização das expressões (V.31) e (V.32); bem como os pontos ( $S_{j-1}, S_j$ ) obtidos em cada placa.

Observa-se que os pontos ( $S_{j-1}, S_j$ ), em sua quase totalidade, situam-se dentro do intervalo de confiança da resposta individual, com grande parte deles concentrando-se no intervalo de confiança dos valores médios.

Entretanto, os valores esperados de  $\beta_1$  determinados pela análise por regressão linear para o conjunto de pontos das placas de cada seção apresentam-se sistematicamente superiores aos valores de  $\beta_1$  obtidos pela análise individual das placas. Na seção B, terceira etapa, para  $\Delta t=60$  dias, o valor de  $\beta_1$  é inclusive superior à unidade.

Esta discrepância se deve à existência de uma dependência entre as ordenadas e abscissas dos pontos da construção de Asaoka para os recalques medidos em uma placa, dependência esta que não se verifica para pontos correspondentes a diferentes placas analisados em conjunto.

Assim, justifica-se o fato de que, na análise em questão, os pontos se encontrem dentro dos intervalos de confiança, porém as retas que estes definem superestimem a inclinação  $\beta_1$ .

A análise por regressão linear pode ser utilizada, no entanto, quando se dispõe de apenas uma placa e deseja-se estimar, a partir da construção de Asaoka para esta, os intervalos de confiança dos valores médios populacionais para os valores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  obtidos.

Encarando agora cada reta de Asaoka, correspondente a cada placa da seção, como um elemento da amostra formada pelo conjunto de construções de Asaoka feitas para cada uma das placas, pode-se calcular para cada seção os valores médios e desvios padrão das distribuições das médias amostrais, para  $\beta_0$  e  $\beta_1$  em cada seção, respectivamente pelas expressões (V.3) e (V.12). Estes resultados, bem como os coeficientes de variação, obtidos dividindo-se o desvio padrão de uma variável por sua média, encontram-se apresentados nas tabelas (VI.6) e (VI.7) a seguir, respectivamente para os intervalos de tempo  $\Delta t=30$  dias e  $\Delta t=60$  dias.

**TABELA VI.6 - Médias, Desvios Padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  -  $\Delta t=30$  dias**

SEÇÃO	ETAPA	$\beta_0$			$\beta_1$		
		MEDIA (mm)	DESVIO PADRÃO (mm)	COEF. DE VAR.	MEDIA (mm)	DESVIO PADRÃO (mm)	COEF. DE VAR.
A	2a	45,68	0,97	0,02	0,9415	0,0018	0,002
B	2a	45,08	2,95	0,07	0,9589	0,0041	0,004
	3a	139,92	10,00	0,07	0,9279	0,0029	0,003
C	2a	59,43	3,87	0,07	0,9402	0,0041	0,004
	3a	172,97	8,94	0,05	0,9159	0,0044	0,005
D	2a	121,46	6,93	0,06	0,8986	0,0035	0,004
	3a	208,52	12,11	0,06	0,9057	0,0037	0,004
E	2a	54,27	2,37	0,04	0,9469	0,0037	0,004
	3a	138,08	11,39	0,08	0,9262	0,0034	0,004
F	2a	66,41	1,46	0,02	0,9354	0,0020	0,002
	3a	145,27	3,44	0,02	0,9243	0,0017	0,002
G	2a	44,32	2,07	0,05	0,9495	0,0022	0,002
	3a	100,02	10,07	0,10	0,9345	0,0076	0,008

**TABELA VI.7 - Médias, Desvios Padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  -  $\Delta t=60$  dias**

SEÇÃO	ETAPA	$\beta_0$			$\beta_1$		
		MÉDIA (mm)	DESVIO PADRÃO (mm)	COEF. DE VAR.	MÉDIA (mm)	DESVIO PADRÃO (mm)	COEF. DE VAR.
A	2ª	88,60	1,85	0,02	0,8867	0,0036	0,004
B	2ª	87,33	5,18	0,06	0,9228	0,0006	0,001
	3ª	268,24	19,76	0,07	0,8619	0,0059	0,007
C	2ª	114,16	7,17	0,06	0,8858	0,0076	0,009
	3ª	328,47	16,21	0,05	0,8406	0,0077	0,009
D	2ª	227,20	9,82	0,04	0,8103	0,0043	0,005
	3ª	381,83	20,30	0,05	0,8286	0,0060	0,007
E	2ª	104,46	4,29	0,04	0,8988	0,0068	0,008
	3ª	246,20	18,75	0,08	0,8702	0,0047	0,005
F	2ª	126,98	2,44	0,02	0,8771	0,0038	0,004
	3ª	269,81	7,41	0,03	0,8607	0,0045	0,005
G	2ª	84,45	3,78	0,04	0,9048	0,0038	0,004
	3ª	196,41	19,37	0,10	0,8698	0,0158	0,018

Através da determinação dos valores da média e desvio padrão da distribuição das médias, é possível estabelecer intervalos de confiança dos valores médios verdadeiros (ou populacionais) para  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , ou seja, a faixa de valores dentro da qual estaria situado, com um nível de confiança  $c$ , o valor médio do parâmetro analisado. Este procedimento visa a incluir na análise as incertezas devidas à amostragem reduzida.

## VI.5 Cálculo dos Recalques Finais e Coeficientes de Adensamento Pelo Método de Asaoka Modificado

A partir dos resultados apresentados nas tabelas VI.6 e VI.7, utiliza-se o método da Expansão em Série de Taylor, descrito no item V.8 deste trabalho, para a obtenção de estimativas das propriedades das distribuições das médias dos recalques finais e coeficientes de adensamento.

A partir destas propriedades são estabelecidos os intervalos de confiança da média, para um nível de confiança  $c$  igual a 95%, para os parâmetros analisados.

### VI.5.1 Recalques Finais

Partindo-se da equação (III.12) de  $S_\infty = f(\beta_0, \beta_1)$ , tem-se pelas equações (V.37) e (V.38):

$$\bar{S}_\infty = \frac{\bar{\beta}_0}{1 - \bar{\beta}_1} \quad (\text{VI.1})$$

$$(\sigma_{\bar{S}_{\infty}})^2 = \left( \frac{1}{1-\bar{\beta}_1} \right)^2 \cdot (\sigma_{\bar{\beta}_0})^2 + \left( \frac{-\bar{\beta}_0}{(1-\bar{\beta}_1)^2} \right) \cdot (\sigma_{\bar{\beta}_1})^2 \quad (\text{VI.2})$$

onde:

$\bar{\beta}_0$  e  $\bar{\beta}_1$  são respectivamente os valores médios amostrais de  $\beta_0$  e  $\beta_1$ ;

$\sigma_{\bar{\beta}_0}$  e  $\sigma_{\bar{\beta}_1}$  são respectivamente os valores dos desvios padrão das distribuições das médias de  $\beta_0$  e  $\beta_1$ ;

$\bar{S}_{\infty}$  e  $\sigma_{\bar{S}_{\infty}}$  são respectivamente a média e o desvio padrão da distribuição das médias de  $S_{\infty}$ .

As tabelas VI.8 e VI.9 apresentam os valores médios e desvios padrão para a distribuição das médias do recalque final  $S_{\infty}$ , calculados de acordo com a metodologia apresentada, bem como os coeficientes de variação, em cada seção, por etapa de carregamento, respectivamente para os intervalos de tempo  $\Delta t=30$  e 60 dias.

Os intervalos de confiança da média de  $S_{\infty}$ , apresentados nas tabelas VI.10 e VI.11, foram obtidos, com base nas expressões (V.13) e (V.14), para um nível de confiança  $c=0,95$  ou 95% ( $Z_c=1,96$ ).

É importante observar que o recalque  $S_{\infty}$ , calculado para cada etapa, corresponde ao somatório dos recalques ocorridos desde o início da construção do aterro, incluindo os recalques devidos à aplicação da etapa em questão.

**TABELA VI.8 Médias, Desvios Padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $S_{\infty}$   $\Delta t=30$  dias**

SEÇÃO	2ª ETAPA			3ª ETAPA		
	$\bar{S}_{\infty}$ (mm)	$\sigma_{\bar{S}_{\infty}}$ (mm)	COEF. DE VAR.	$\bar{S}_{\infty}$ (mm)	$\sigma_{\bar{S}_{\infty}}$ (mm)	COEF. DE VAR.
A	781	29	0,04	-	-	-
B	1097	131	0,12	1941	159	0,08
C	994	94	0,09	2057	151	0,07
D	1198	80	0,07	2211	155	0,07
E	1022	84	0,08	1871	177	0,09
F	1028	39	0,04	1919	63	0,03
G	878	56	0,06	1527	235	0,15

**TABELA VI.9 Médias, Desvios Padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $S_{\infty}$   $\Delta t=60$  dias**

SEÇÃO	2ª ETAPA			3ª ETAPA		
	$\bar{S}_{\infty}$ (mm)	$\sigma \bar{S}_{\infty}$ (mm)	COEF. DE VAR.	$\bar{S}_{\infty}$ (mm)	$\sigma \bar{S}_{\infty}$ (mm)	COEF. DE VAR.
A	782	53	0,07	-	-	-
B	1131	68	0,06	1942	165	0,08
C	1000	91	0,09	2061	142	0,07
D	1198	58	0,05	2228	142	0,06
E	1032	81	0,08	1897	160	0,08
F	1033	38	0,04	1937	82	0,04
G	887	53	0,06	1509	236	0,16



**TABELA VI.10 Intervalos de Confiança dos Valores Médios de  $S_{\infty}$  (mm) -  $\Delta t=30$  dias**

SEÇÃO	2ª ETAPA	3ª ETAPA
A	724 - 838	-
B	840 - 1353	1629 - 2253
C	810 - 1178	1760 - 2353
D	1041 - 1354	1907 - 2515
E	857 - 1187	1525 - 2217
F	952 - 1105	1796 - 2042
G	768 - 987	1066 - 1988

**TABELA VI.11 Intervalos de Confiança dos Valores Médios de  $S_{\infty}$  (mm) -  $\Delta t=60$  dias**

SEÇÃO	2ª ETAPA	3ª ETAPA
A	723 - 841	-
B	999 - 1264	1618 - 2267
C	820 - 1179	1782 - 2340
D	1083 - 1312	1950 - 2506
E	873 - 1192	1583 - 2210
F	959 - 1107	1776 - 2098
G	783 - 991	1074 - 1889

### VI.5.2 Coeficientes de adensamento:

Na estimativa dos coeficientes de adensamento, os valores de altura de drenagem ( $H_d$ ), diâmetro de influência do drenos ( $d_e$ ), função  $F(n)$  e intervalo de tempo  $\Delta t$  foram considerados como parâmetros determinísticos.

O valor de  $\Delta t$  é fixo para cada análise. Os valores de  $H_d$ ,  $d_e$  e  $F(n)$ , porém, são sujeitos a variação, podendo portanto serem introduzidos no cálculo dos coeficientes de adensamento através das propriedades de suas distribuições (média e desvios padrão). Nesta análise isto não foi feito devido ao desconhecimento destas propriedades, por falta de dados.

#### a) Seções sem drenos verticais

Para as seções sem drenos, com o valor de  $a_1$  dado pela equação (III.27) tem-se:

$$c_v = \frac{-4}{\pi^2} \cdot H_d^2 \cdot \frac{\ln(\beta_1)}{\Delta t} \quad (\text{VI.3})$$

Aplicando-se as equações (V.37) e (V.38) tem-se:

$$\bar{c}_v = \frac{-4}{\pi^2} \cdot H_d^2 \cdot \frac{\ln(\bar{\beta}_1)}{\Delta t} \quad (\text{VI.4})$$

$$(\sigma_{\bar{c}_v})^2 = \left( \frac{-4}{\pi^2} \cdot \frac{H_d^2}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\beta_1} \right) \cdot (\sigma_{\bar{\beta}_1})^2 \quad (\text{VI.5})$$

onde:

$\bar{c}_v$  e  $\sigma\bar{c}_v$  são respectivamente a média e o desvio padrão da distribuição das médias de  $c_v$ .

As tabelas VI.12 e VI.13 apresentam os valores médios e desvios padrão para a distribuição das médias do coeficiente de adensamento vertical  $c_v$ , calculados de acordo com a metodologia apresentada, bem como os coeficientes de variação, para as seções sem drenos, por etapa de carregamento, respectivamente para os intervalos de tempo  $\Delta t=30$  e  $\Delta t=60$  dias.

Os intervalos de confiança da média de  $c_v$ , apresentados na tabela VI.14, para  $\Delta t=30$  dias e  $\Delta t=60$  dias, foram obtidos, com base nas expressões (V.13) e (V.14), para um nível de confiança  $c=0,95$  ou 95% ( $Z_c=1,96$ ).

**TABELA VI.12 Médias, Desvios padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $C_v$  Para as Seções Sem Drenos -  $\Delta t=30$  dias**

SEÇÃO	ETAPA	$\bar{c}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma\bar{c}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	coefic. de var.
A	2a	24,90	0,79	0,03
G	2a	15,76	0,70	0,04
	3a	17,29	2,08	0,12

**TABELA VI.13 Médias, Desvios padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $C_v$  Para as Seções Sem Drenos -  $\Delta t=60$  dias**

SEÇÃO	ETAPA	$\bar{C}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{C}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	coefic. de var.
A	2a	24,84	0,84	0,03
G	2a	15,21	0,64	0,04
	3a	17,80	2,32	0,13

**TABELA VI.14 Intervalos de Confiança dos Valores Médios de  $C_v$  Para as Seções Sem Drenos ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )**

SEÇÃO	ETAPA	delta t = 30 dias	delta t = 60 dias
A	2a	23,35 - 26,45	23,19 - 26,49
G	2a	15,05 - 16,46	14,57 - 15,85
	3a	15,05 - 19,53	15,48 - 20,12

#### **b) Seções com drenos verticais**

Para as seções com drenos, devido à impossibilidade de se separarem as parcelas de contribuição de drenagem radial (horizontal) e vertical no processo de adensamento, já que os dois processos de drenagem ocorrem simultaneamente, é feito um estudo paramétrico usando-se o artifício de se introduzir no estudo uma variável  $\Gamma$ , igual à relação  $c_h/c_v$ .

Com o valor de  $a_1$  dado pela equação (III.33) tem-se:

$$c_v = \frac{-\ln(\beta_1)}{\Delta t} \times \frac{1}{\frac{8 \cdot (c_h/c_v)}{d_e^2 \cdot F(n)} + \frac{\pi^2}{4 \cdot H_d^2}} \quad (\text{VI.6})$$

Fazendo  $\Gamma = c_h/c_v$  na equação (VI.6) e aplicando as equações (V.37) e (V.38) tem-se:

$$\bar{c}_v = \frac{-\ln(\bar{\beta}_1)}{\Delta t} \times \frac{1}{\frac{8 \cdot \Gamma}{d_e^2 \cdot F(n)} + \frac{\pi^2}{4 \cdot H_d^2}} \quad (\text{VI.7})$$

$$(\sigma_{\bar{c}_v})^2 = \left( \frac{-1}{\bar{\beta}_1 \cdot \Delta t} \times \frac{1}{\frac{8 \cdot \Gamma}{d_e^2 \cdot F(n)} + \frac{\pi^2}{4 \cdot H_d^2}} \right)^2 \cdot (\sigma_{\bar{\beta}_1})^2 \quad (\text{VI.8})$$

Fazendo-se variar  $\Gamma$ , determinaram-se os valores de média e desvio padrão dos valores médios de  $c_v$  para cada relação  $c_h/c_v$  arbitrada, utilizando-se as equações (VI.7) e (VI.8).

Foi feito variar o valor  $\Gamma$  de 0 até 2, visto ser igual a 2 a relação entre  $c_h$  e  $c_v$  na argila do Sarapuí, para o nível de tensões atuantes, de acordo com as figuras IV.15 e IV.16 desta tese.

As tabelas VI.15 a VI.19 apresentam os valores médios e desvios padrão para a distribuição das médias do coeficiente de adensamento vertical  $c_v$  em função de  $\Gamma$ , bem como os coeficientes de variação, calculados para as seções com

drenos, por etapa de carregamento, para os intervalos de tempo  $\Delta t=30$  e  $\Delta t=60$  dias.

Os intervalos de confiança da média de  $c_v$ , calculados para um nível de confiança  $c=0,95$  ou 95% ( $Z_c=1,96$ ) estão apresentados nas tabelas VI.20 e VI.24.

**TABELA VI.15 Médias, Desvios padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos**

SEÇÃO B							
ETAPA	$c_h/c_v$	delta t = 30 dias			delta t = 60 dias		
		$\bar{c}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{c}_v$	coef. de var.	$\bar{c}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{c}_v$	coef. de var.
2a	0,0	17,47	1,78	0,10	16,72	0,14	0,008
	0,1	9,36	0,95		8,96	0,07	
	0,2	6,39	0,65		6,12	0,05	
	0,3	4,85	0,49		4,64	0,04	
	0,5	3,27	0,33		3,13	0,03	
	0,8	2,20	0,22		2,11	0,02	
	1,0	1,81	0,18		1,73	0,01	
	1,3	1,42	0,15		1,36	0,01	
	1,5	1,25	0,13		1,19	0,01	
	1,8	1,05	0,11		1,01	0,01	
	2,0	0,95	0,10		0,91	0,01	
3a	0,0	25,96	1,08	0,04	25,78	1,19	0,05
	0,1	15,07	0,63		14,96	0,69	
	0,2	10,62	0,44		10,54	0,49	
	0,3	8,19	0,34		8,14	0,37	
	0,5	5,63	0,24		5,59	0,26	
	0,8	3,83	0,16		3,80	0,18	
	1,0	3,16	0,13		3,13	0,14	
	1,3	2,50	0,10		2,48	0,11	
	1,5	2,19	0,09		2,18	0,10	
	1,8	1,85	0,08		1,84	0,08	
	2,0	1,68	0,07		1,67	0,08	

**TABKLA VI.16 Médias, Desvios padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos**

SEÇÃO C							
ETAPA	$c_h/c_v$	delta t = 30 dias			delta t = 60 dias		
		$\bar{C}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{C}_v$	coef. de var.	$\bar{C}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{C}_v$	coef. de var.
2a	0,0	25,57	1,81	0,07	25,14	1,78	0,07
	0,1	13,72	0,97		13,49	0,95	
	0,2	9,37	0,66		9,22	0,65	
	0,3	7,12	0,50		7,00	0,50	
	0,5	4,81	0,34		4,73	0,33	
	0,8	3,23	0,23		3,18	0,22	
	1,0	2,65	0,19		2,61	0,18	
	1,3	2,09	0,15		2,06	0,15	
	1,5	1,83	0,13		1,80	0,13	
	1,8	1,55	0,11		1,52	0,11	
	2,0	1,40	0,10		1,38	0,10	
3a	0,0	30,34	1,66	0,05	29,99	1,58	0,05
	0,1	17,65	0,96		17,44	0,92	
	0,2	12,44	0,68		12,30	0,65	
	0,3	9,61	0,53		9,49	0,50	
	0,5	6,60	0,36		6,52	0,34	
	0,8	4,49	0,25		4,44	0,23	
	1,0	3,70	0,20		3,66	0,19	
	1,3	2,93	0,16		2,90	0,15	
	1,5	2,57	0,14		2,54	0,13	
	1,8	2,17	0,12		2,15	0,11	
	2,0	1,97	0,11		1,95	0,10	

**TABELA VI.17 Médias, Desvios padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos**

SEÇÃO D							
ETAPA	$c_n/c_v$	delta t = 30 dias			delta t = 60 dias		
		$\bar{c}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{c}_v$	coef. de var.	$\bar{c}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{c}_v$	coef. de var.
2a	0,0	44,00	1,60	0,04	43,28	1,09	0,03
	0,1	23,69	0,86		23,30	0,59	
	0,2	16,21	0,59		15,94	0,40	
	0,3	12,32	0,45		12,12	0,31	
	0,5	8,32	0,30		8,19	0,21	
	0,8	5,60	0,20		5,51	0,14	
	1,0	4,60	0,17		4,52	0,11	
	1,3	3,62	0,13		3,56	0,09	
	1,5	3,17	0,12		3,12	0,08	
	1,8	2,68	0,10		2,63	0,07	
	2,0	2,42	0,09		2,39	0,06	
3a	0,0	32,06	1,32	0,04	30,43	1,17	0,04
	0,1	19,15	0,79		18,18	0,70	
	0,2	13,65	0,56		12,96	0,50	
	0,3	10,61	0,44		10,07	0,39	
	0,5	7,33	0,30		6,96	0,27	
	0,8	5,01	0,21		4,76	0,18	
	1,0	4,14	0,17		3,93	0,15	
	1,3	3,28	0,14		3,12	0,12	
	1,5	2,88	0,12		2,74	0,11	
	1,8	2,44	0,10		2,32	0,09	
	2,0	2,21	0,09		2,10	0,08	



**TABELA VI.18 Médias, Desvios padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos**

SEÇÃO E							
ETAPA	$c_h/c_v$	delta t = 30 dias			delta t = 60 dias		
		$\bar{C}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{C}_v$	coef. de var.	$\bar{C}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{C}_v$	coef. de var.
2a	0,0	22,02	1,58	0,07	21,53	1,53	0,07
	0,1	12,34	0,88		12,06	0,86	
	0,2	8,57	0,61		8,38	0,59	
	0,3	6,57	0,47		6,42	0,46	
	0,5	4,47	0,32		4,37	0,31	
	0,8	3,03	0,22		2,96	0,21	
	1,0	2,49	0,18		2,43	0,17	
	1,3	1,97	0,14		1,92	0,14	
	1,5	1,72	0,12		1,69	0,12	
	1,8	1,46	0,10		1,42	0,10	
	2,0	1,32	0,09		1,29	0,09	
3a	0,0	24,93	1,19	0,05	22,60	0,88	0,04
	0,1	15,27	0,73		13,85	0,54	
	0,2	11,01	0,53		9,98	0,39	
	0,3	8,61	0,41		7,80	0,30	
	0,5	5,99	0,29		5,43	0,21	
	0,8	4,12	0,20		3,73	0,14	
	1,0	3,41	0,16		3,09	0,12	
	1,3	2,70	0,13		2,45	0,10	
	1,5	2,38	0,11		2,16	0,08	
	1,8	2,01	0,10		1,83	0,07	
	2,0	1,83	0,09		1,66	0,06	

**TABELA VI.19 Médias, Desvios padrão e Coeficientes de Variação das Distribuições das Médias de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos**

SEÇÃO F							
ETAPA	$c_h/c_v$	delta t = 30 dias			delta t = 60 dias		
		$\bar{c}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{c}_v$	coef. de var.	$\bar{c}_v$ ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )	$\sigma \bar{c}_v$	coef. de var.
2a	0,0	25,59	0,82	0,03	25,12	0,83	0,03
	0,1	15,50	0,50		15,22	0,50	
	0,2	11,12	0,36		10,92	0,36	
	0,3	8,67	0,28		8,51	0,28	
	0,5	6,02	0,19		5,91	0,20	
	0,8	4,12	0,13		4,05	0,13	
	1,0	3,41	0,11		3,35	0,11	
	1,3	2,71	0,09		2,66	0,09	
	1,5	2,38	0,08		2,34	0,08	
	1,8	2,01	0,06		1,98	0,07	
	2,0	1,83	0,06		1,79	0,06	
3a	0,0	24,05	0,56	0,02	22,91	0,80	0,03
	0,1	15,83	0,37		15,09	0,53	
	0,2	11,80	0,28		11,25	0,39	
	0,3	9,41	0,22		8,96	0,31	
	0,5	6,69	0,16		6,38	0,22	
	0,8	4,67	0,11		4,45	0,16	
	1,0	3,89	0,09		3,70	0,13	
	1,3	3,11	0,07		2,96	0,10	
	1,5	2,74	0,06		2,61	0,09	
	1,8	2,33	0,05		2,22	0,08	
	2,0	2,11	0,05		2,01	0,07	

**TABELA VI.20 Intervalos de Confiança dos Valores Médios de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )**

SEÇÃO B			
ETAPA	$c_h/c_v$	delta t = 30 dias	delta t = 60 dias
2a	0,0	15,69 - 19,25	16,59 - 16,86
	0,1	8,40 - 10,31	8,88 - 9,03
	0,2	5,74 - 7,04	6,07 - 6,17
	0,3	4,36 - 5,35	4,61 - 4,68
	0,5	2,94 - 3,61	3,11 - 3,16
	0,8	1,98 - 2,43	2,09 - 2,12
	1,0	1,62 - 1,99	1,72 - 1,74
	1,3	1,28 - 1,57	1,35 - 1,37
	1,5	1,12 - 1,37	1,18 - 1,20
	1,8	0,94 - 1,16	1,00 - 1,02
	2,0	0,86 - 1,05	0,90 - 0,92
3a	0,0	24,87 - 27,04	24,59 - 26,96
	0,1	14,44 - 15,70	14,27 - 15,65
	0,2	10,17 - 11,06	10,06 - 11,03
	0,3	7,85 - 8,54	7,76 - 8,51
	0,5	5,39 - 5,86	5,33 - 5,85
	0,8	3,67 - 3,99	3,63 - 3,28
	1,0	3,02 - 3,29	2,99 - 3,28
	1,3	2,39 - 2,60	2,37 - 2,59
	1,5	2,10 - 2,28	2,08 - 2,28
	1,8	1,78 - 1,93	1,76 - 1,93
	2,0	1,61 - 1,75	1,59 - 1,75

**TABELA VI.21 Intervalos de Confiança dos Valores Médios de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )**

SEÇÃO C			
ETAPA	$c_h/c_v$	delta t = 30 dias	delta t = 60 dias
2a	0,0	23,76 - 27,38	23,37 - 26,92
	0,1	12,75 - 14,69	12,54 - 14,45
	0,2	8,71 - 10,04	8,57 - 9,87
	0,3	6,62 - 7,62	6,51 - 7,50
	0,5	4,47 - 5,15	4,39 - 5,06
	0,8	3,00 - 3,46	2,95 - 3,40
	1,0	2,47 - 2,84	2,42 - 2,79
	1,3	1,94 - 2,24	1,91 - 2,20
	1,5	1,70 - 1,96	1,67 - 1,93
	1,8	1,44 - 1,65	1,41 - 1,63
	2,0	1,30 - 1,50	1,28 - 1,47
3a	0,0	28,68 - 32,00	28,41 - 31,57
	0,1	16,68 - 18,61	16,52 - 18,36
	0,2	11,76 - 13,12	11,65 - 12,94
	0,3	9,08 - 10,13	8,99 - 10,00
	0,5	6,24 - 6,96	6,18 - 6,87
	0,8	4,25 - 4,74	4,20 - 4,67
	1,0	3,50 - 3,91	3,47 - 3,85
	1,3	2,77 - 3,09	2,74 - 3,05
	1,5	2,43 - 2,71	2,41 - 2,68
	1,8	2,06 - 2,29	2,04 - 2,26
	2,0	1,86 - 2,08	1,85 - 2,05

**TABELA VI.22 Intervalos de Confiança dos Valores Médios de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )**

SEÇÃO D			
ETAPA	$c_h/c_v$	delta t = 30 dias	delta t = 60 dias
2a	0,0	42,39 - 45,60	42,19 - 44,37
	0,1	22,83 - 24,55	22,72 - 23,89
	0,2	15,62 - 16,80	15,54 - 16,35
	0,3	11,87 - 12,77	11,81 - 12,42
	0,5	8,02 - 8,63	7,98 - 8,39
	0,8	5,40 - 5,80	5,37 - 5,65
	1,0	4,43 - 4,76	4,41 - 4,64
	1,3	3,49 - 3,76	3,47 - 3,65
	1,5	3,06 - 3,29	3,04 - 3,20
	1,8	2,58 - 2,78	2,57 - 2,70
	2,0	2,34 - 2,51	2,33 - 2,45
3a	0,0	30,74 - 33,38	29,26 - 31,60
	0,1	18,36 - 19,94	17,48 - 18,88
	0,2	13,09 - 14,21	12,46 - 13,46
	0,3	10,17 - 11,04	9,68 - 10,45
	0,5	7,03 - 7,64	6,69 - 7,23
	0,8	4,81 - 5,22	4,58 - 4,94
	1,0	3,97 - 4,31	3,78 - 4,08
	1,3	3,15 - 3,42	3,00 - 3,24
	1,5	2,77 - 3,00	2,63 - 2,84
	1,8	2,34 - 2,54	2,23 - 2,41
	2,0	2,12 - 2,30	2,02 - 2,18

**TABELA VI.23** Intervalos de Confiança dos Valores Médios de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )

SEÇÃO E			
ETAPA	$c_n/c_v$	delta t = 30 dias	delta t = 60 dias
2a	0,0	20,44 - 23,59	20,00 - 23,05
	0,1	11,46 - 13,22	11,21 - 12,92
	0,2	7,96 - 9,19	7,79 - 8,97
	0,3	6,10 - 7,04	5,96 - 6,88
	0,5	4,15 - 4,79	4,06 - 4,68
	0,8	2,81 - 3,24	2,75 - 3,17
	1,0	2,31 - 2,67	2,26 - 2,61
	1,3	1,83 - 2,11	1,79 - 2,06
	1,5	1,60 - 1,85	1,57 - 1,81
	1,8	1,35 - 1,56	1,32 - 1,52
	2,0	1,22 - 1,41	1,20 - 1,38
3a	0,0	23,73 - 26,12	21,72 - 23,48
	0,1	14,54 - 16,01	13,31 - 14,39
	0,2	10,48 - 11,54	9,60 - 10,37
	0,3	8,20 - 9,02	7,50 - 8,11
	0,5	5,71 - 6,28	5,22 - 5,64
	0,8	3,92 - 4,31	3,59 - 3,88
	1,0	3,24 - 3,57	2,97 - 3,21
	1,3	2,58 - 2,83	2,36 - 2,55
	1,5	2,26 - 2,49	2,07 - 2,24
	1,8	1,92 - 2,11	1,76 - 1,90
	2,0	1,74 - 1,92	1,59 - 1,72

**TABELA VI.24 Intervalos de Confiança dos Valores Médios de  $C_v$  Para as Seções Com Drenos ( $m^2/s \times 10^{-8}$ )**

SEÇÃO F			
ETAPA	$C_h/C_v$	delta t = 30 dias	delta t = 60 dias
2a	0,0	24,77 - 26,40	24,29 - 25,95
	0,1	15,01 - 16,00	14,72 - 15,72
	0,2	10,76 - 11,49	10,56 - 11,28
	0,3	8,39 - 8,95	8,23 - 8,79
	0,5	5,82 - 6,21	5,71 - 6,10
	0,8	3,99 - 4,26	3,92 - 4,18
	1,0	3,30 - 3,52	3,24 - 3,46
	1,3	2,62 - 2,79	2,57 - 2,74
	1,5	2,30 - 2,45	2,26 - 2,41
	1,8	1,95 - 2,08	1,91 - 2,04
	2,0	1,77 - 1,88	1,73 - 1,85
3a	0,0	23,48 - 24,61	22,11 - 23,71
	0,1	15,46 - 16,20	14,56 - 15,61
	0,2	11,53 - 12,08	10,86 - 11,64
	0,3	9,19 - 9,63	8,65 - 9,28
	0,5	6,54 - 6,85	6,15 - 6,60
	0,8	4,56 - 4,78	4,30 - 4,61
	1,0	3,80 - 3,98	3,57 - 3,83
	1,3	3,03 - 3,18	2,86 - 3,06
	1,5	2,68 - 2,80	2,52 - 2,70
	1,8	2,27 - 2,38	2,14 - 2,29
	2,0	2,07 - 2,16	1,94 - 2,09

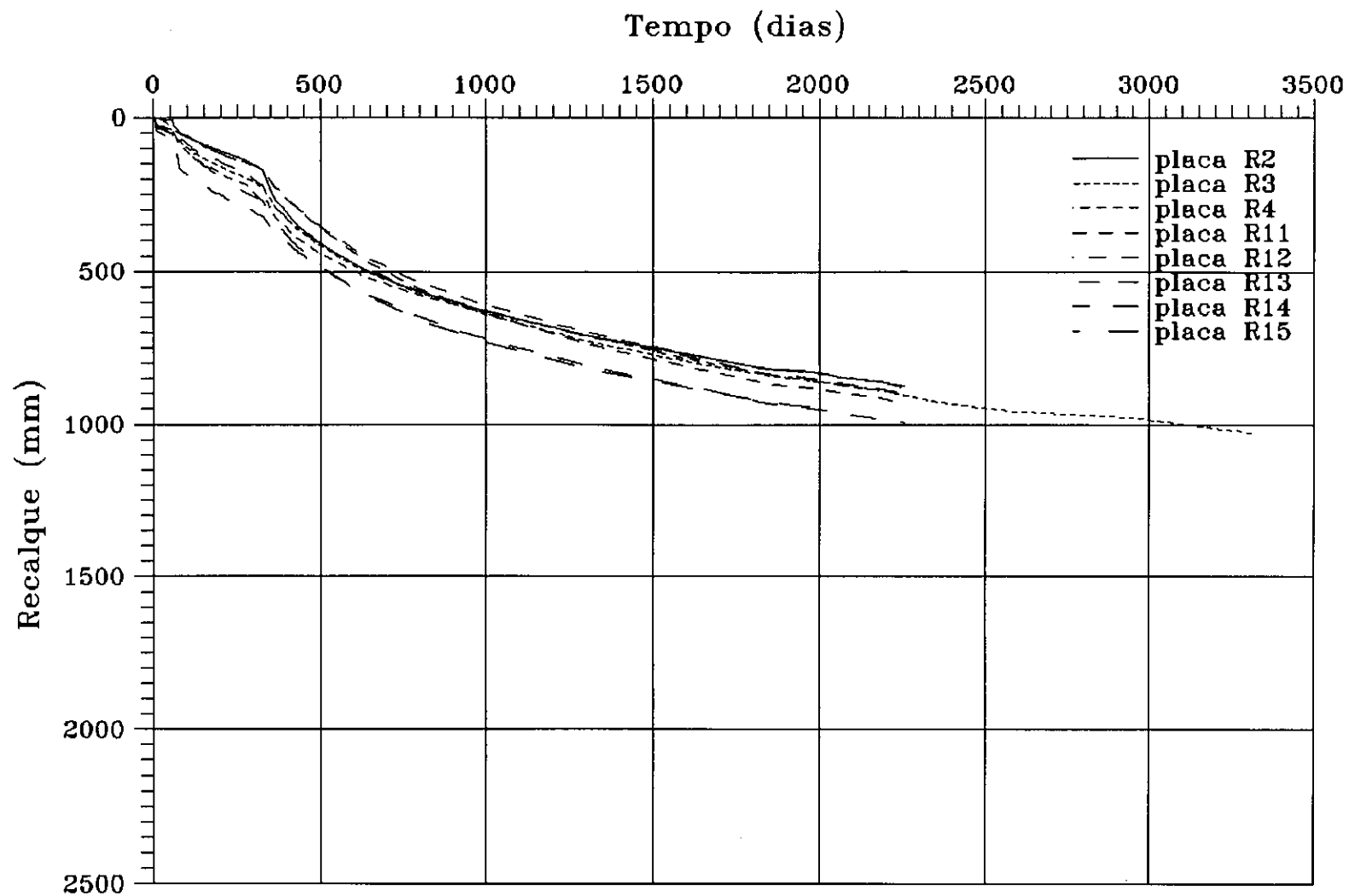


Fig. VI.1 - Curvas Recalque x Tempo das placas de recalque - seção A



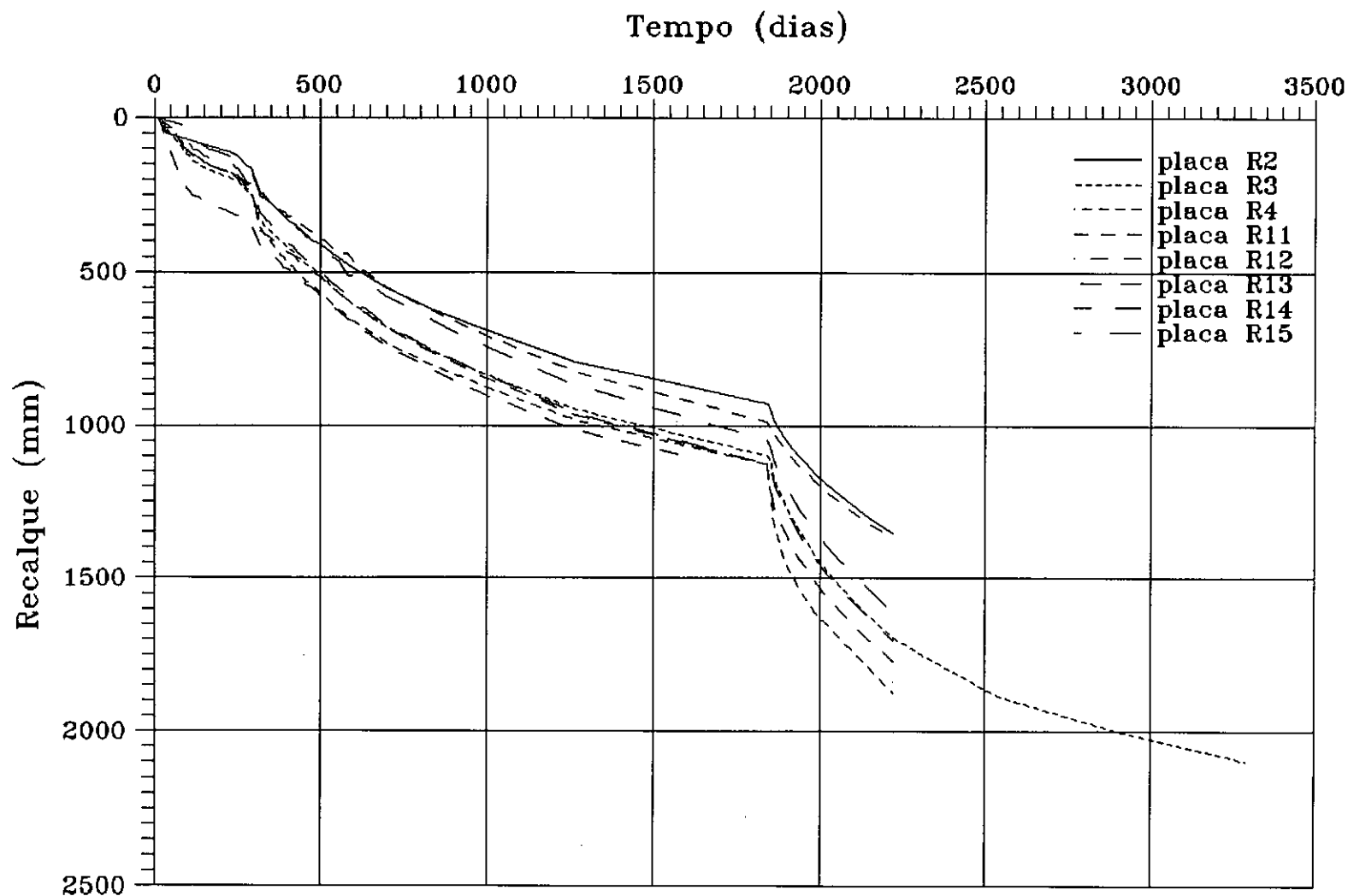


Fig. VI.2 - Curvas Recalque x Tempo das placas de recalque - seção B

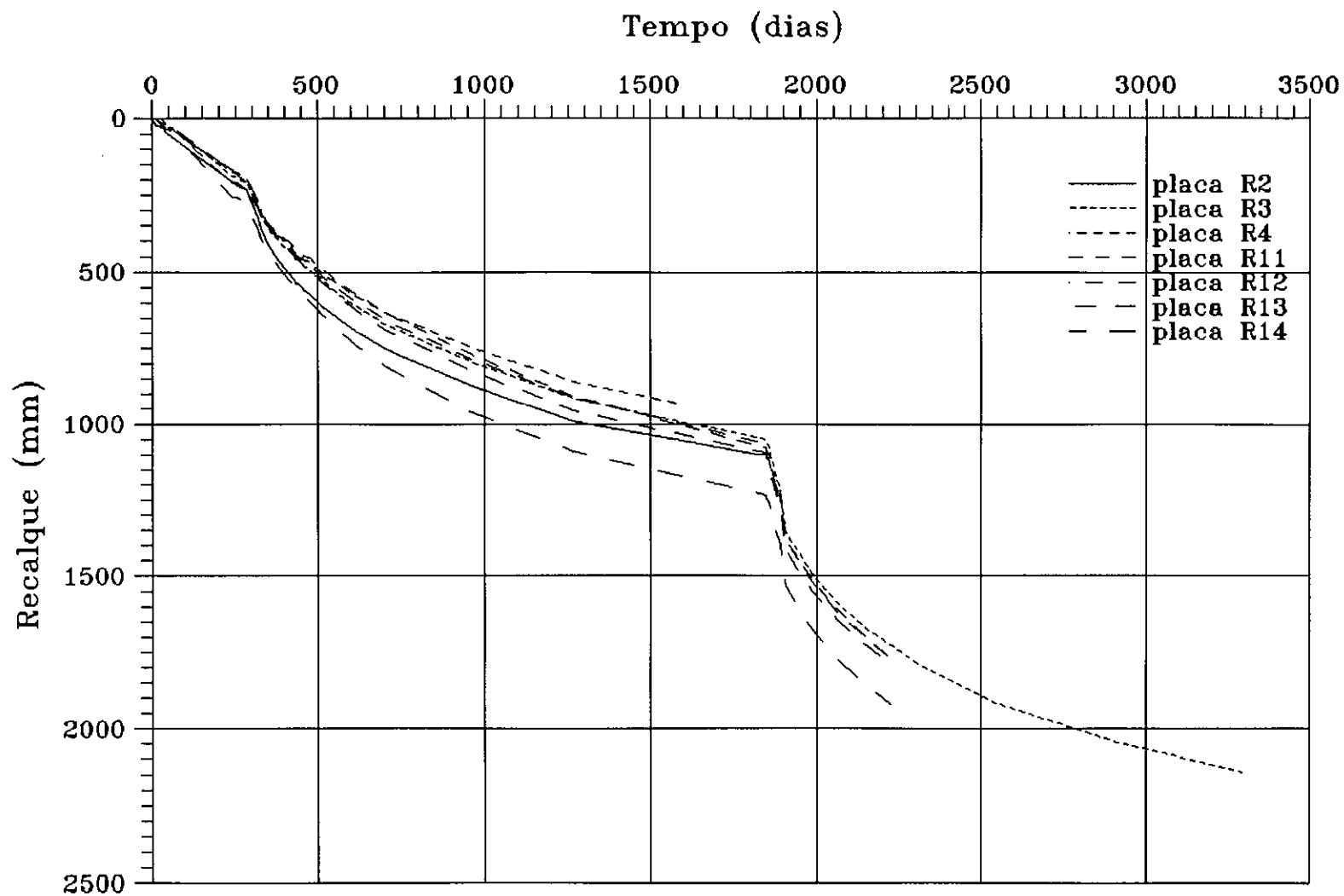


Fig. VI.3 - Curvas Recalque x Tempo das placas de recalque - seção C

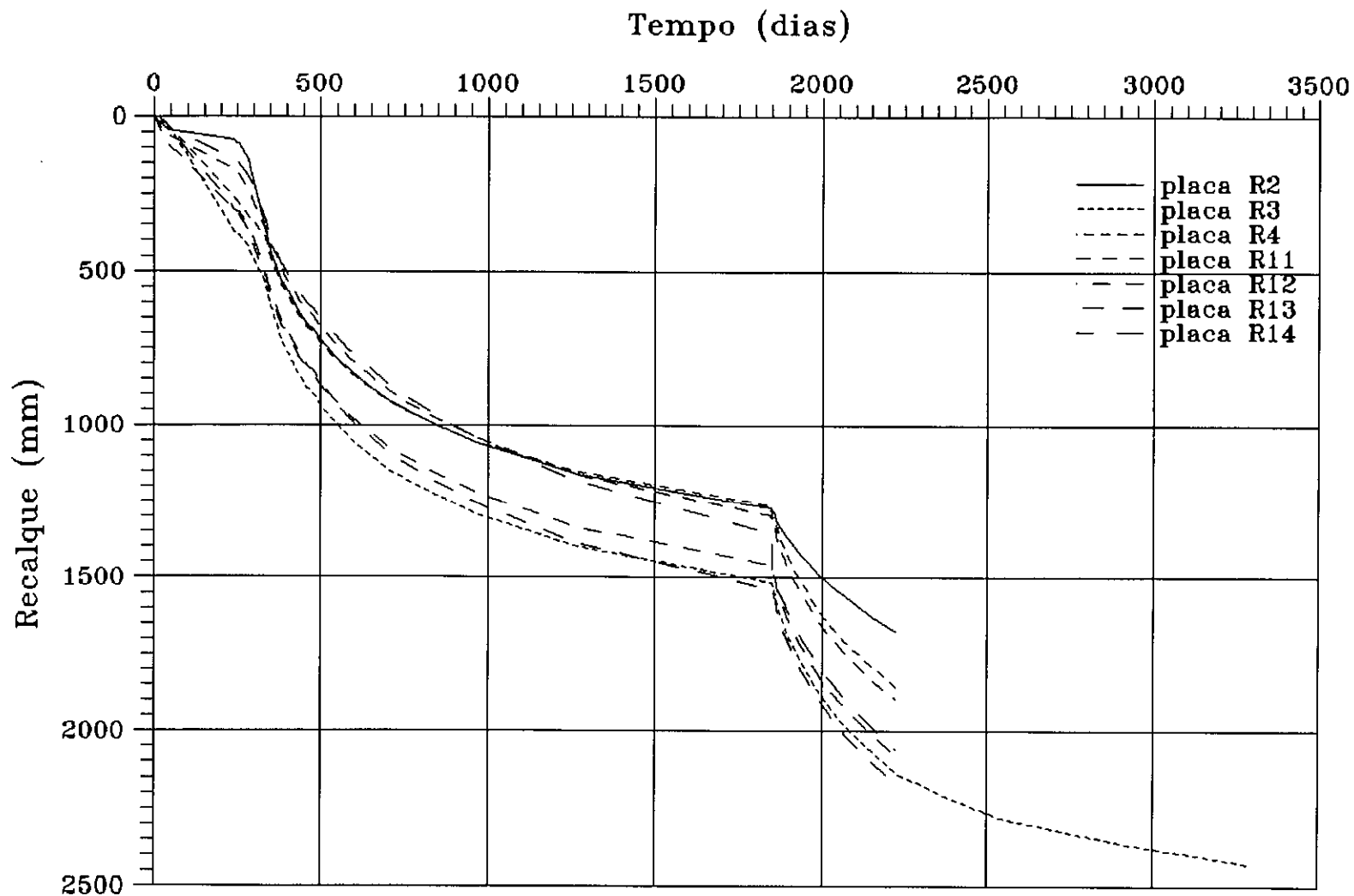


Fig. VI.4 - Curvas Recalque x Tempo das placas de recalque - seção D

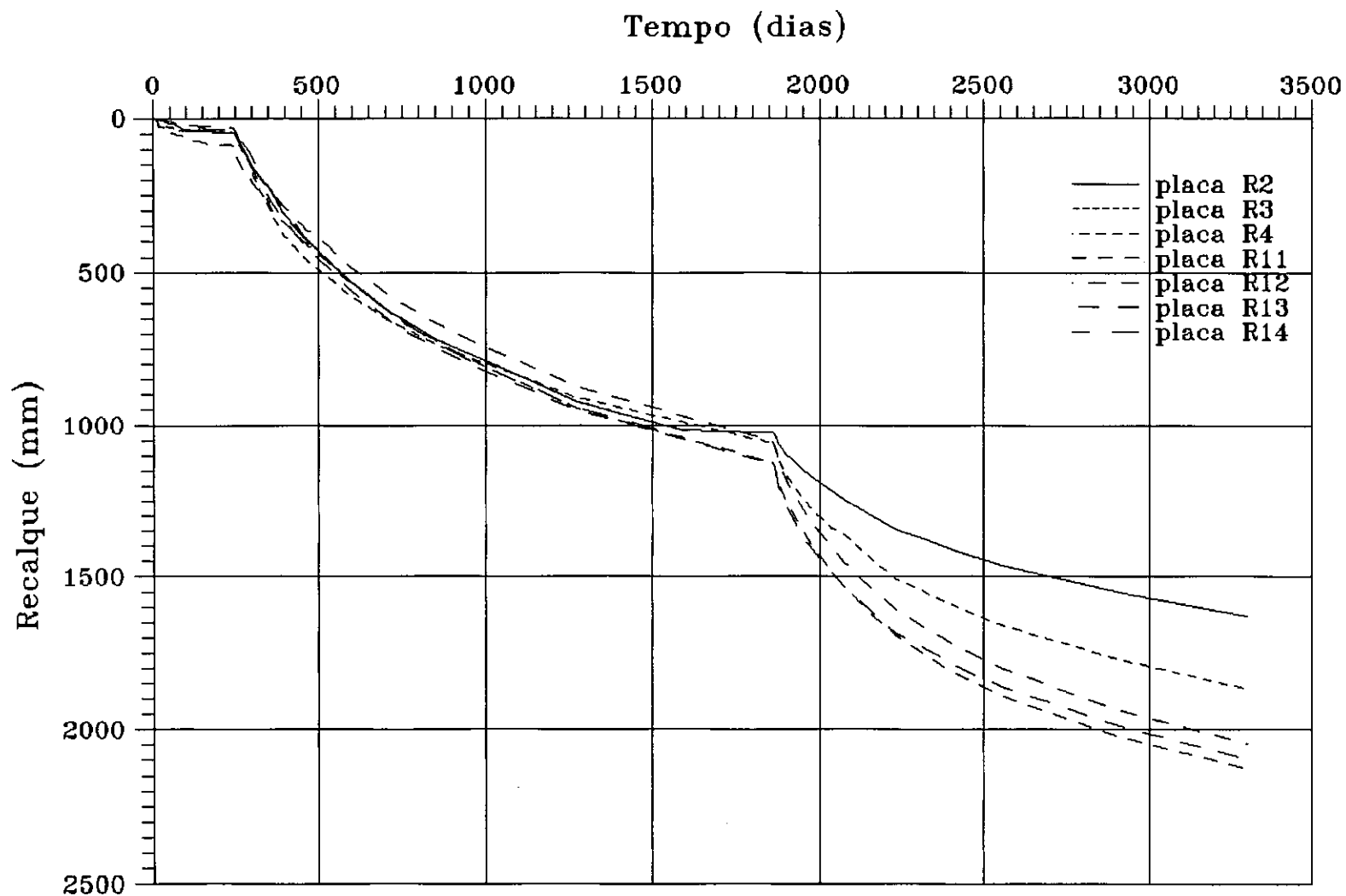


Fig. VI.5 - Curvas Recalque x Tempo das placas de recalque - seção E

Tempo (dias)

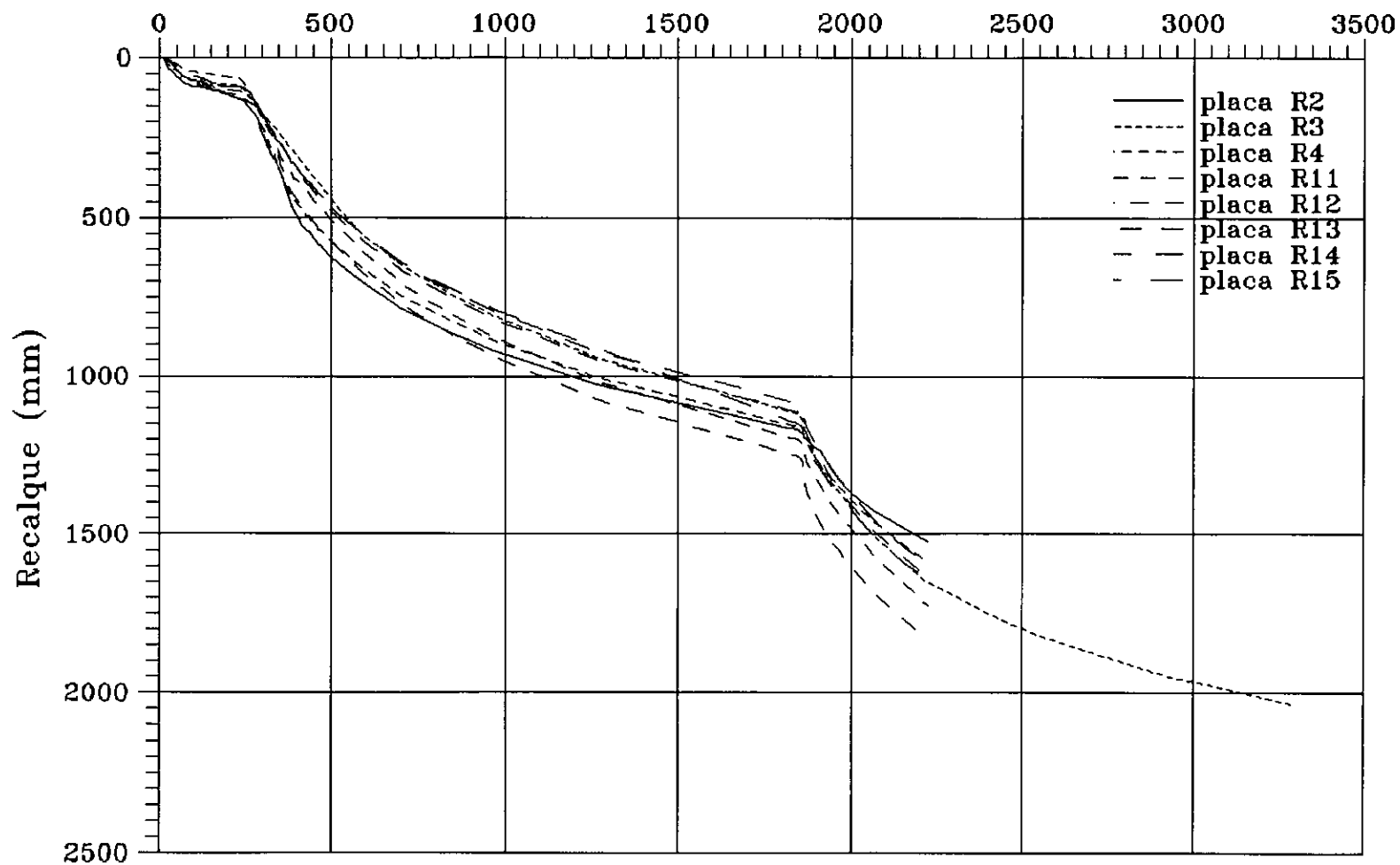


Fig. VI.6 - Curvas Recalque x Tempo das placas de recalque - seção F

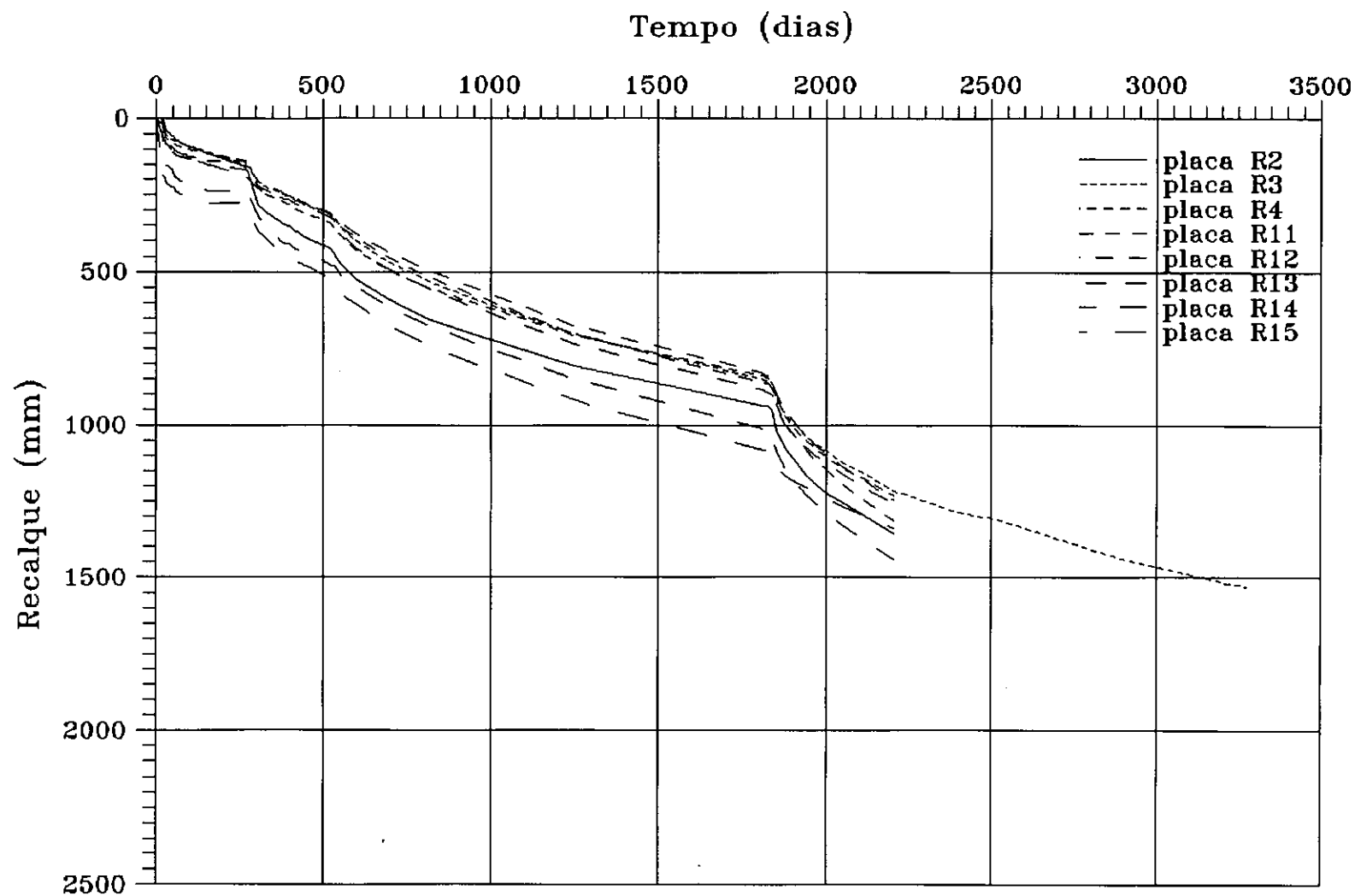


Fig. VI.7 - Curvas Recalque x Tempo das placas de recalque - seção G

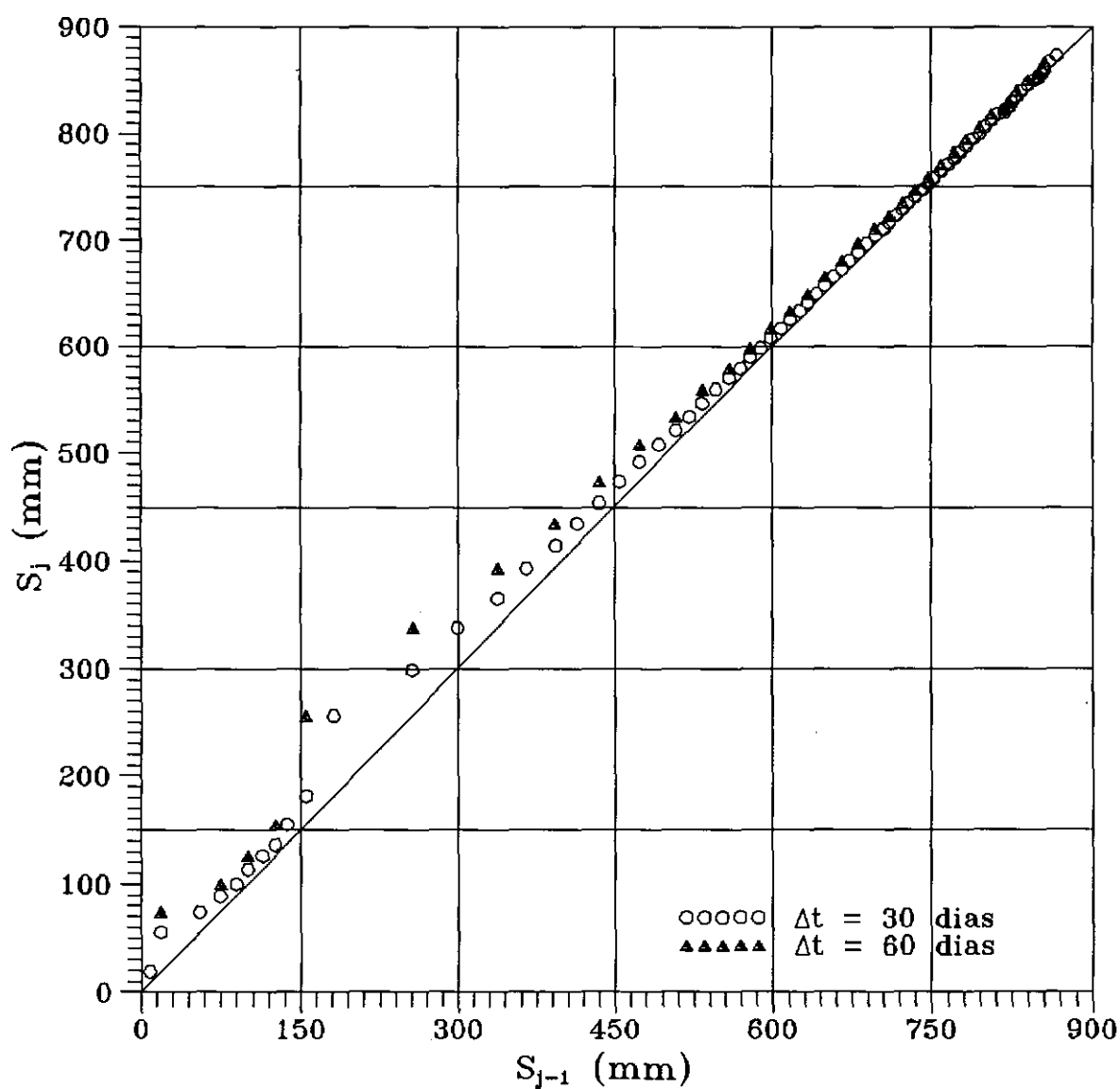


Fig. VI.8 - Construção de Asaoka - seção A - placa R2

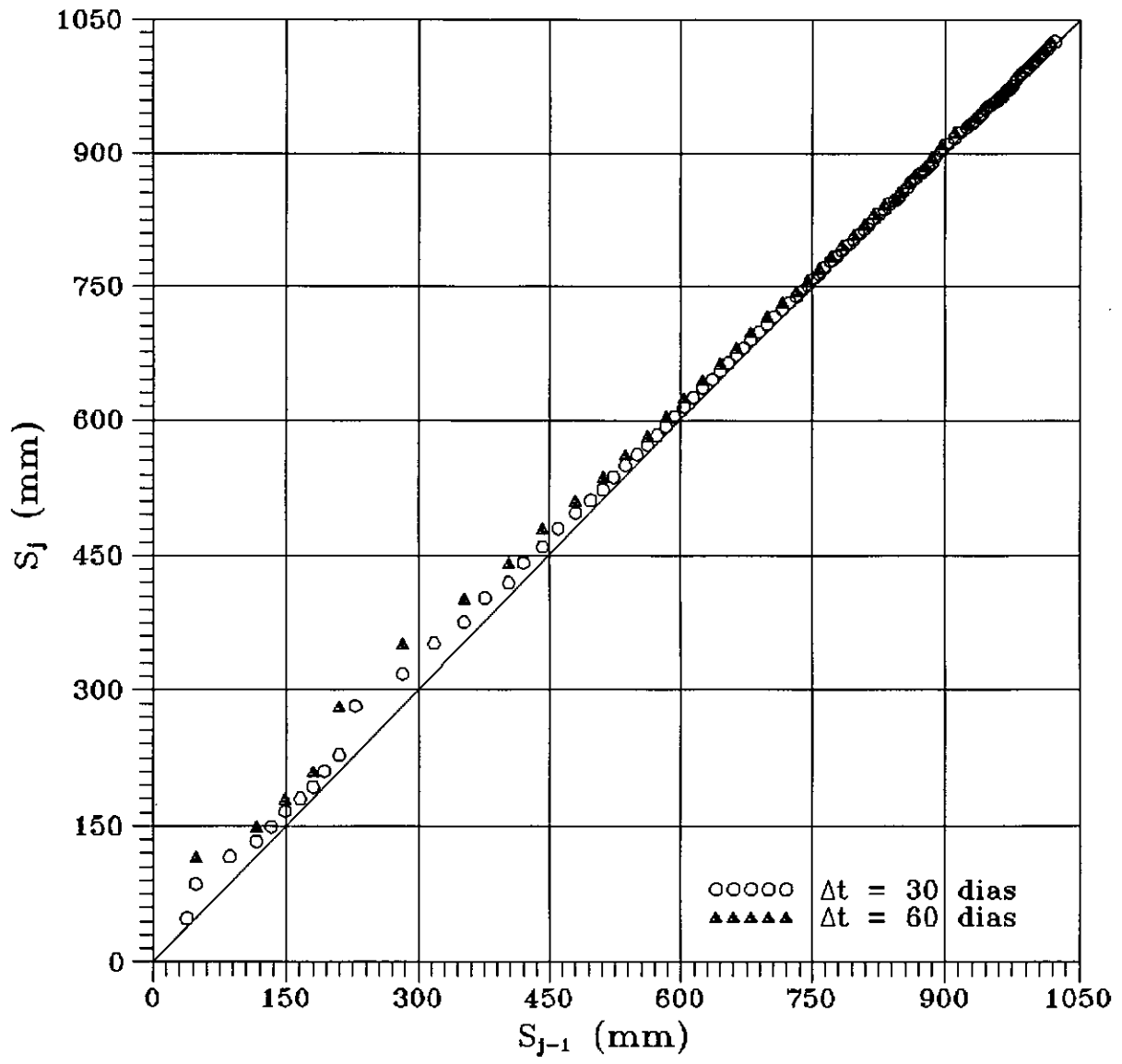


Fig. VI.9 - Construção de Asaoka - seção A - placa R3



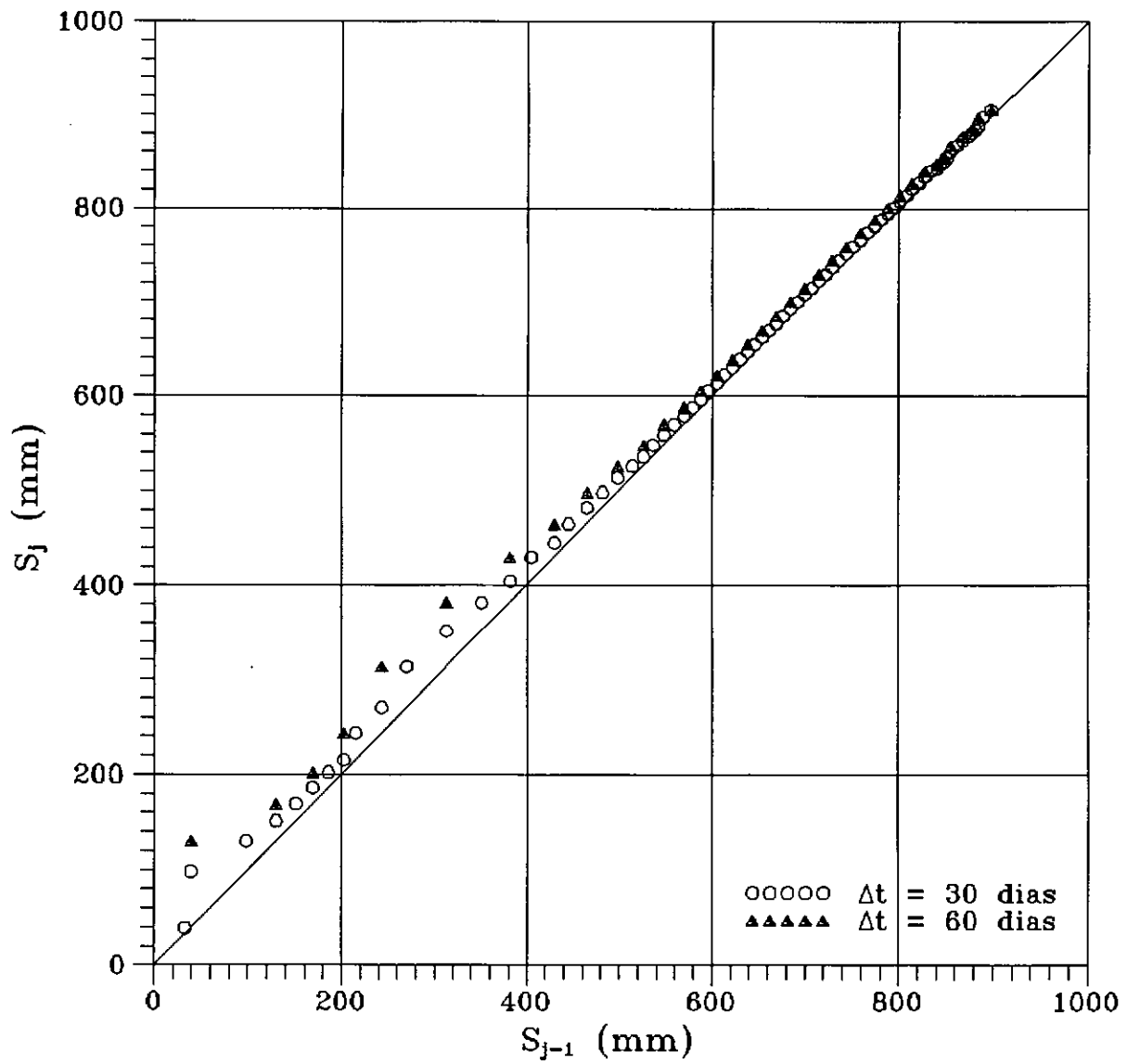


Fig. VI.10 - Construção de Asaoka - seção A - placa R4

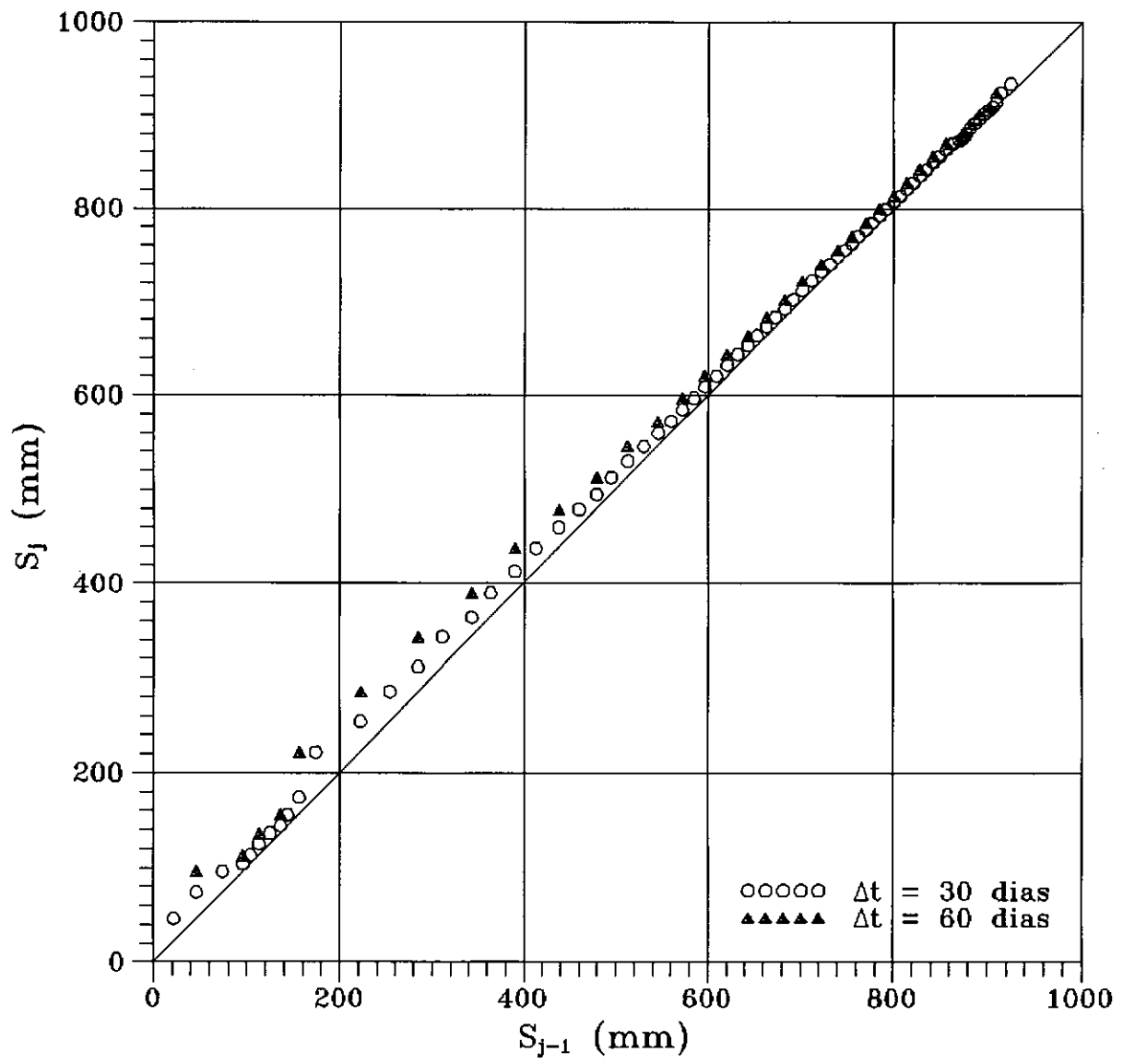


Fig. VI.11 - Construção de Asaoka - seção A - placa R11

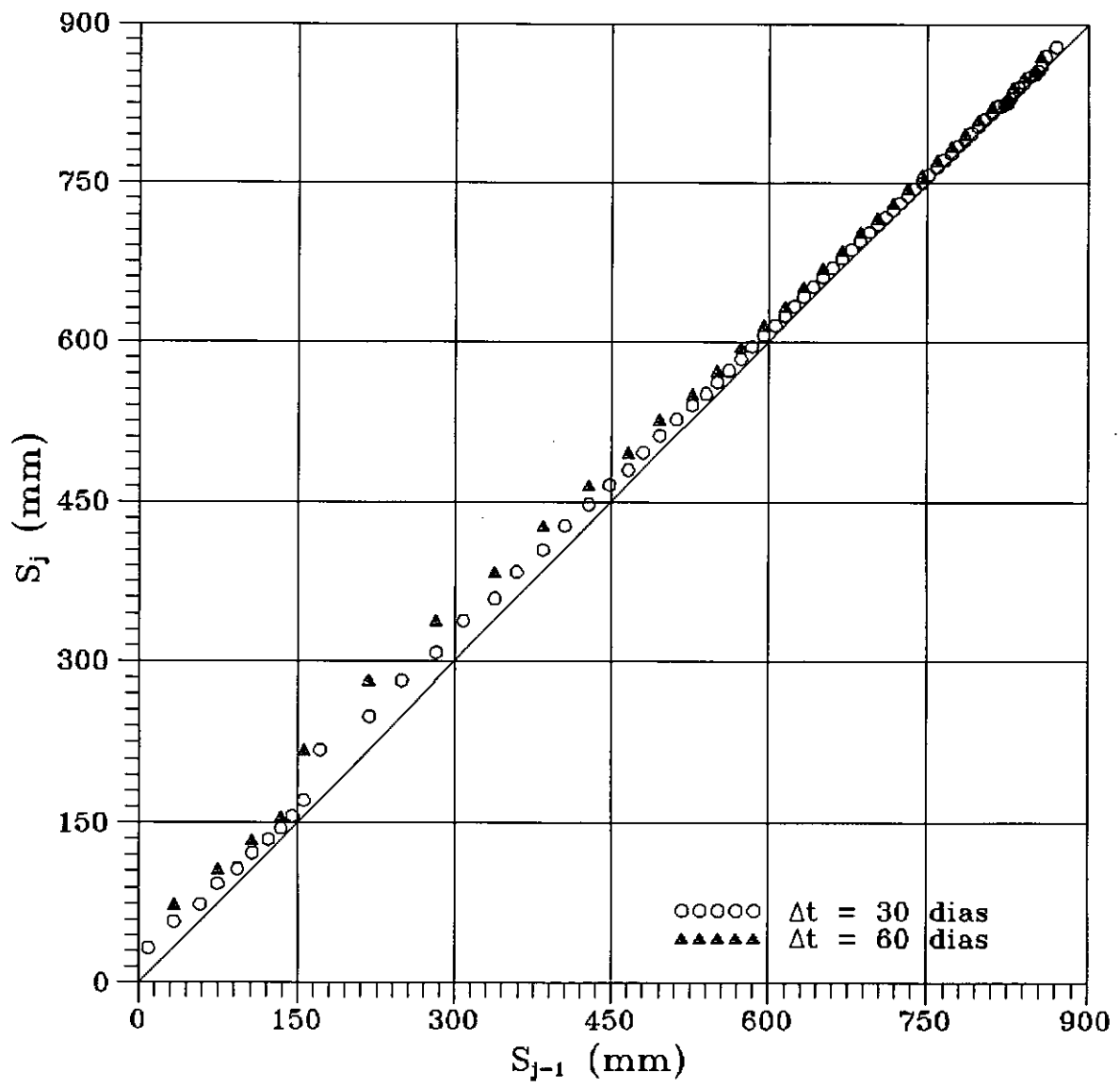


Fig. VI.12 - Construção de Asaoka - seção A - placa R12

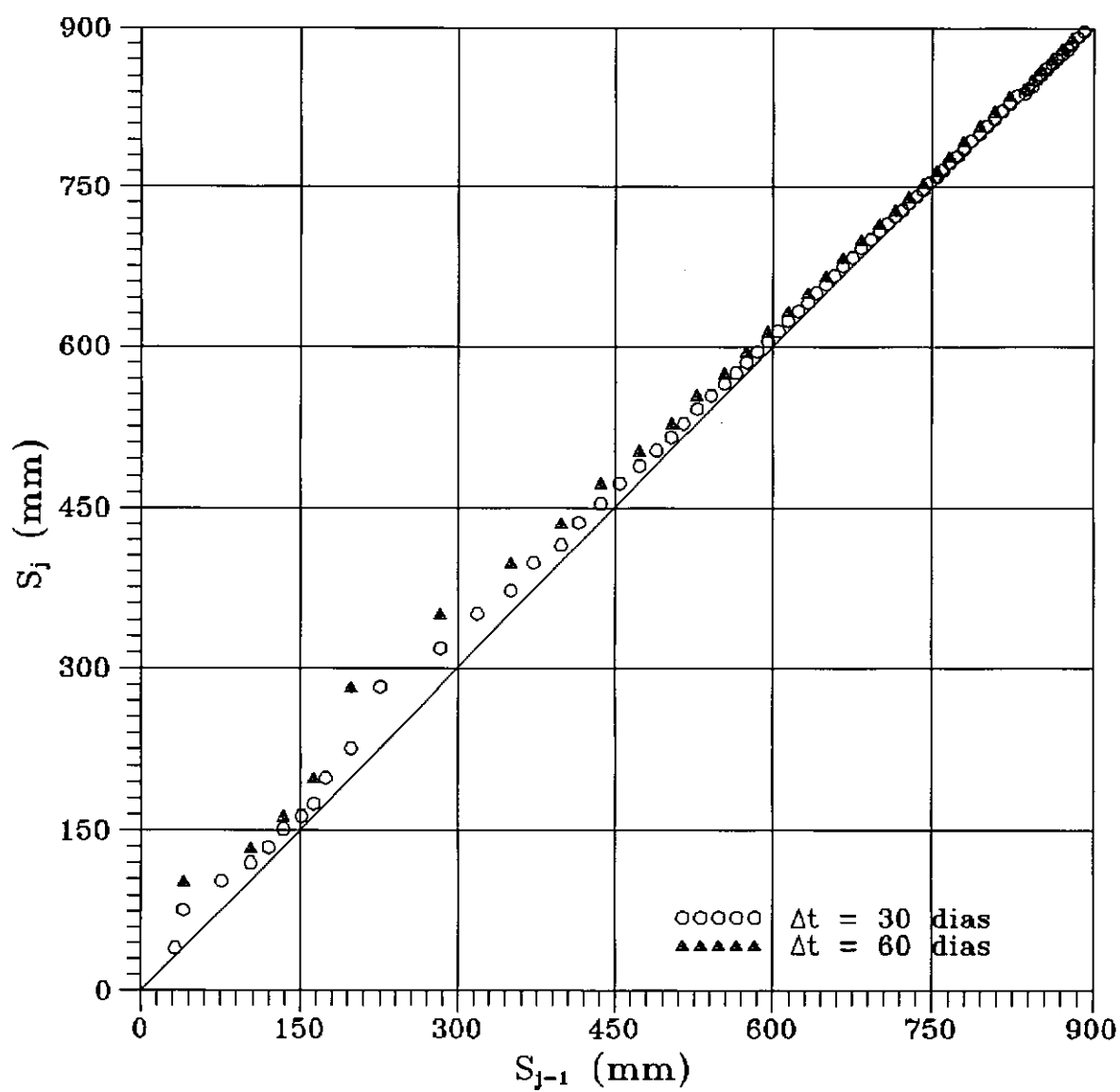


Fig. VI.13 - Construção de Asaoka - seção A - placa R13

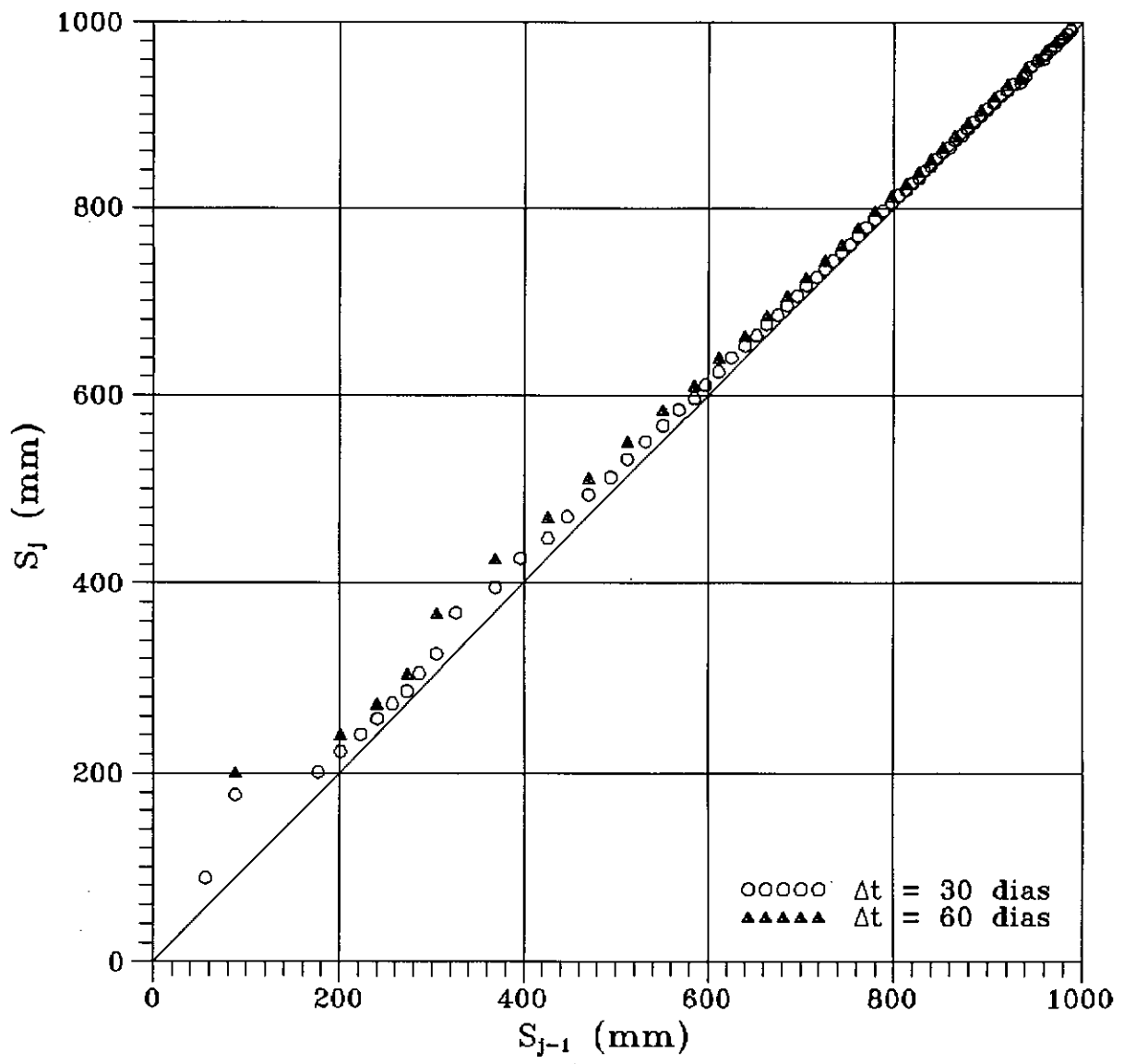


Fig. VI.14 - Construção de Asaoka - seção A - placa R14

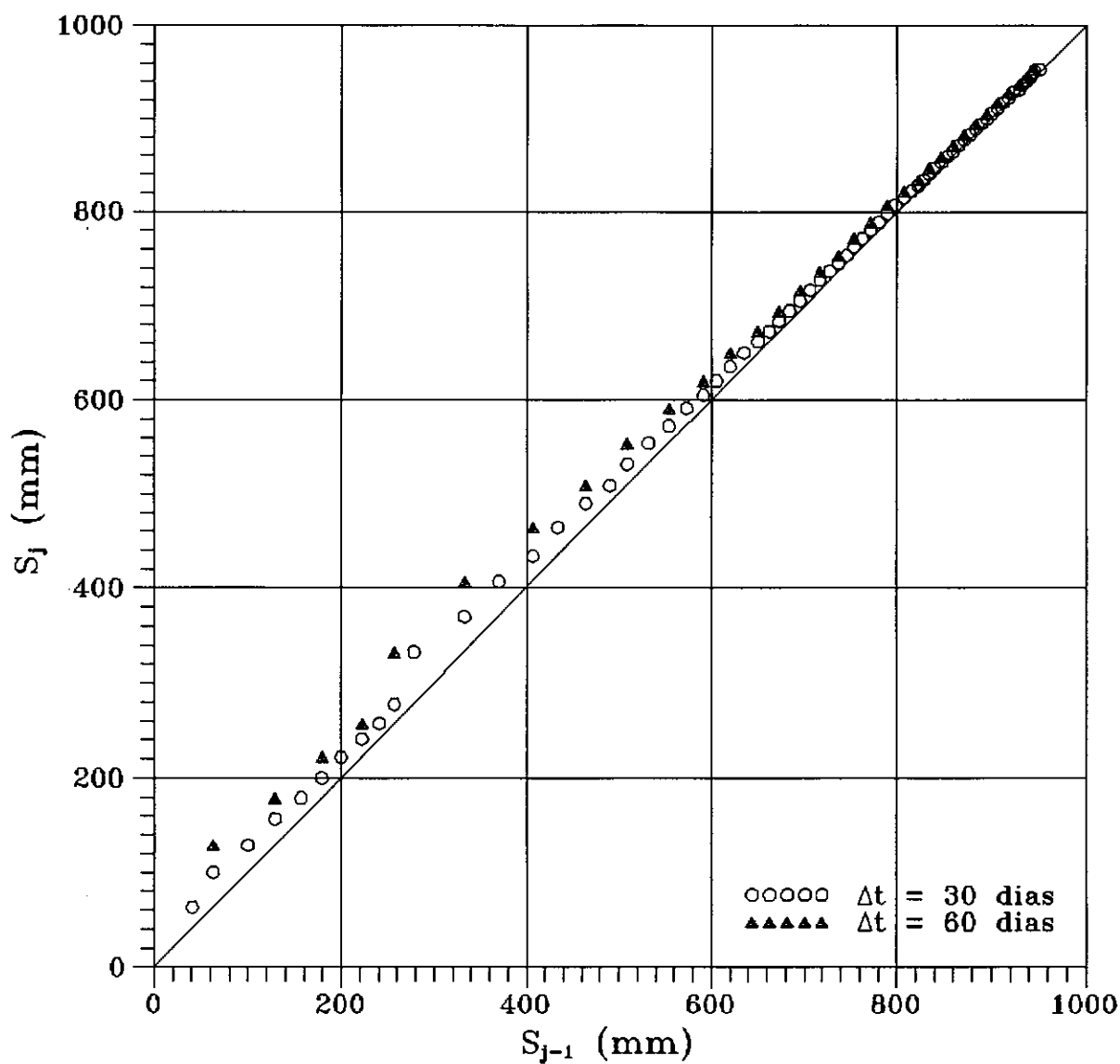


Fig. VI.15 - Construção de Asaoka - seção A - placa R15

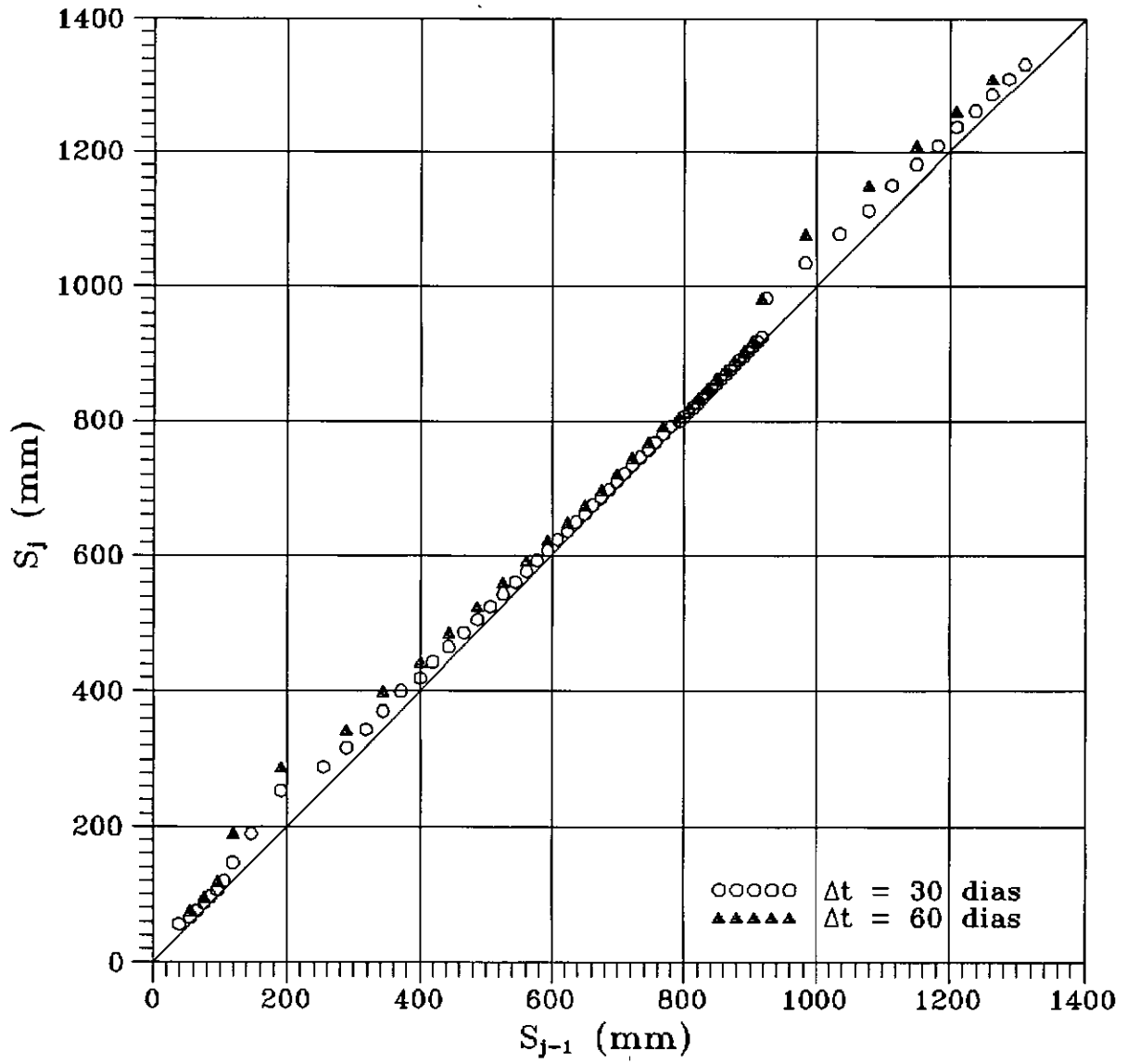


Fig. VI.16 - Construção de Asaoka - seção B - placa R2

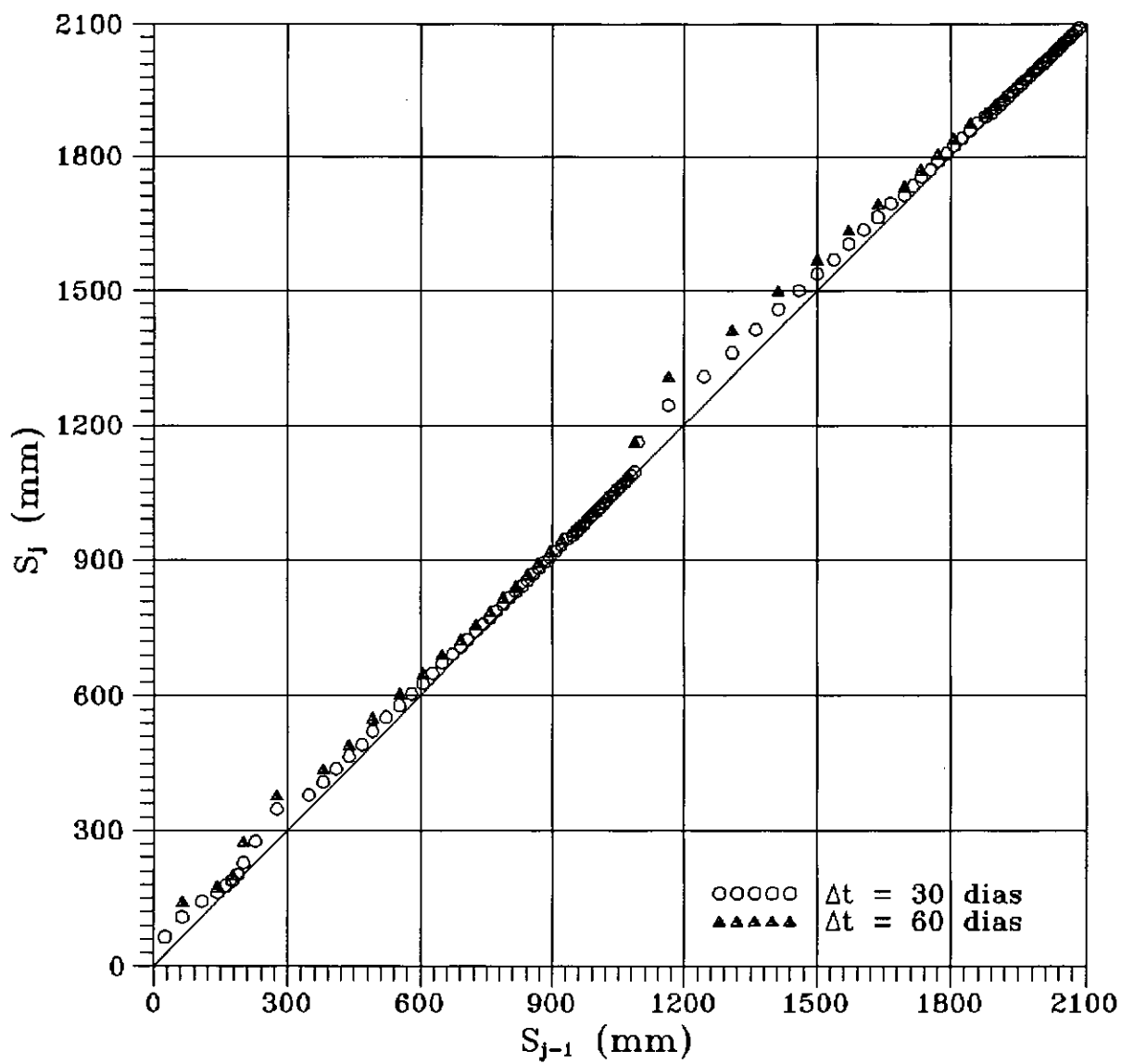


Fig. VI.17 - Construção de Asaoka - seção B - placa R3



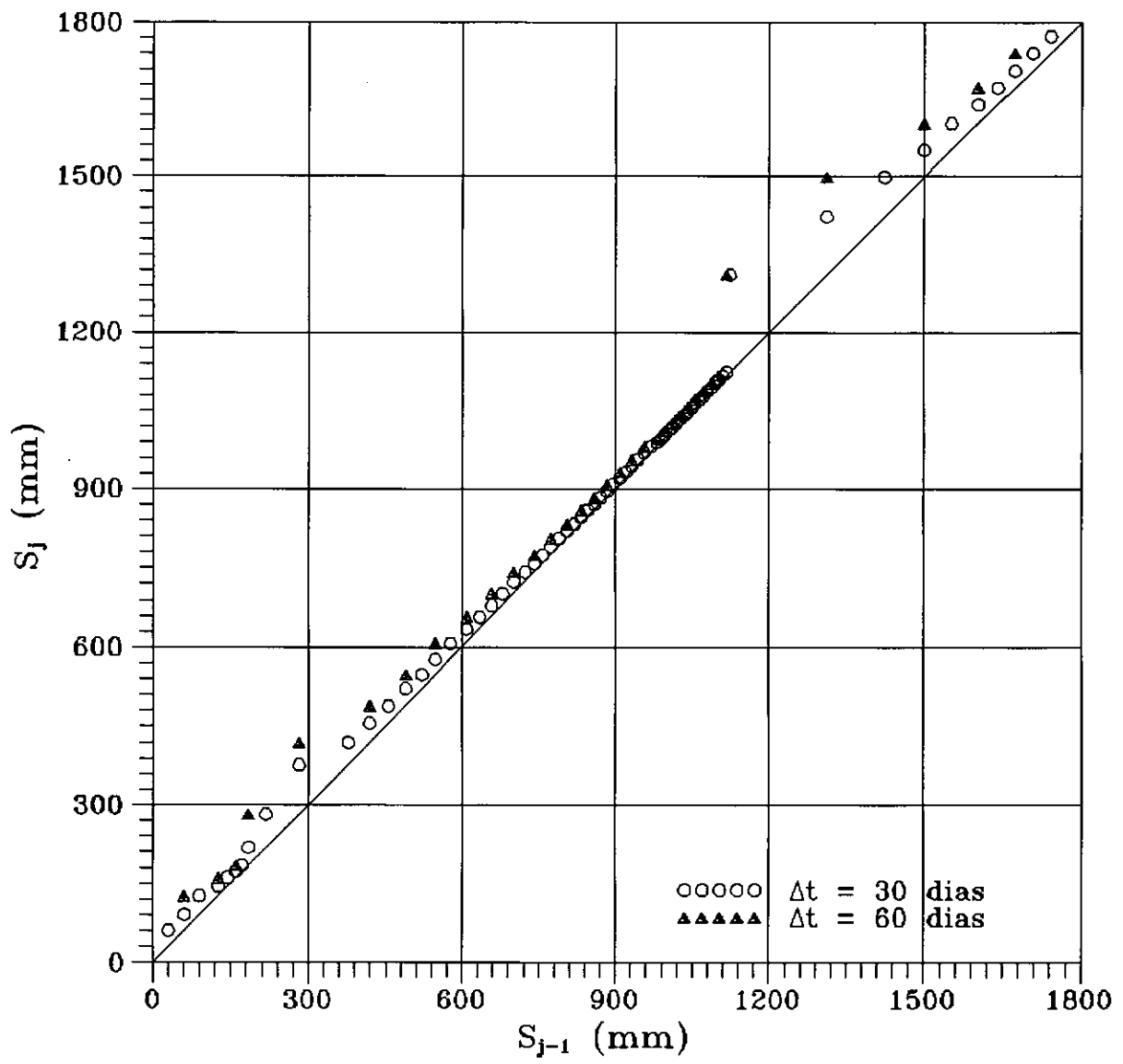


Fig. VI.18 - Construção de Asaoka - seção B - placa R4

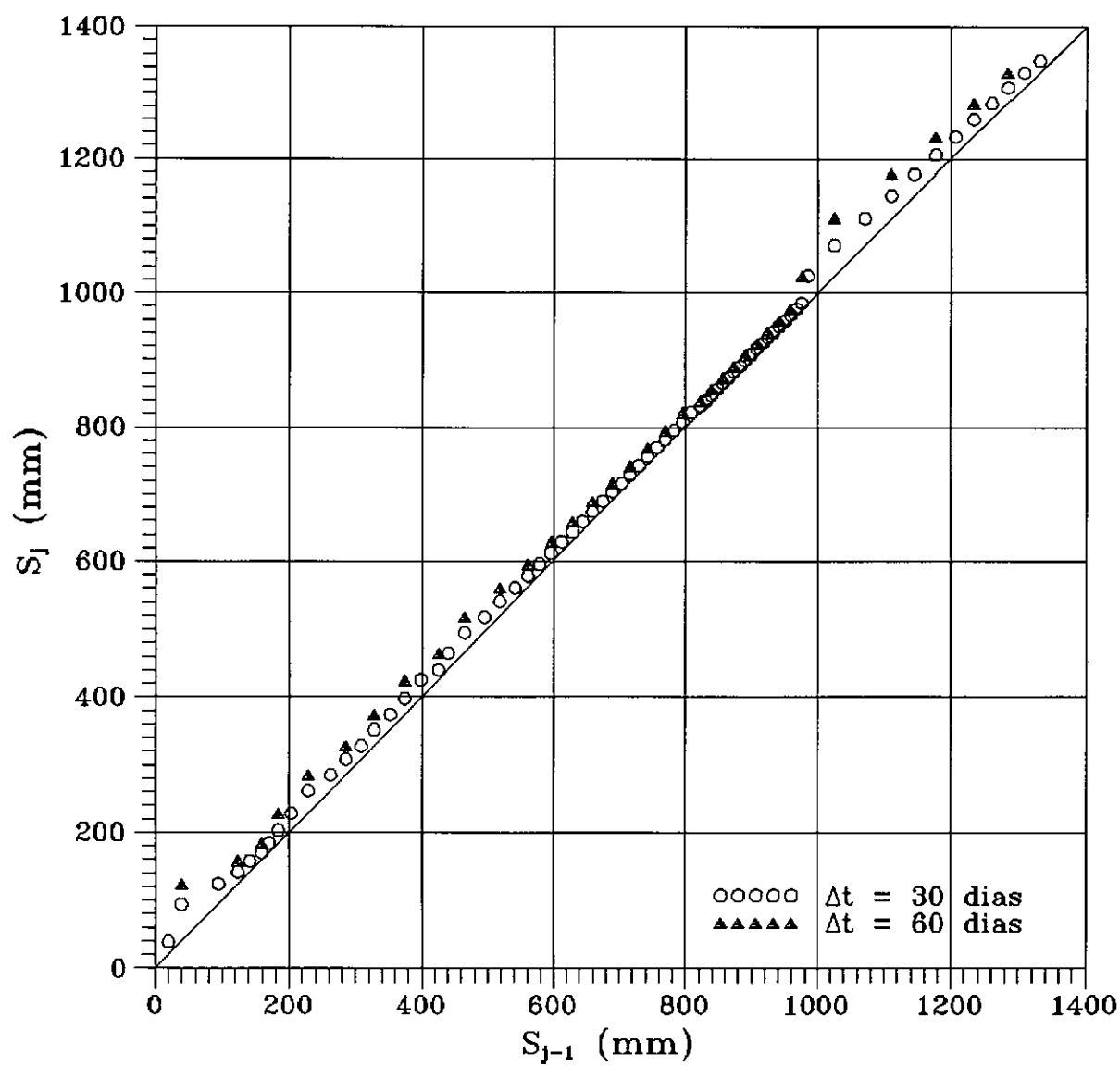


Fig. VI.19 - Construção de Asaoka - seção B - placa R11

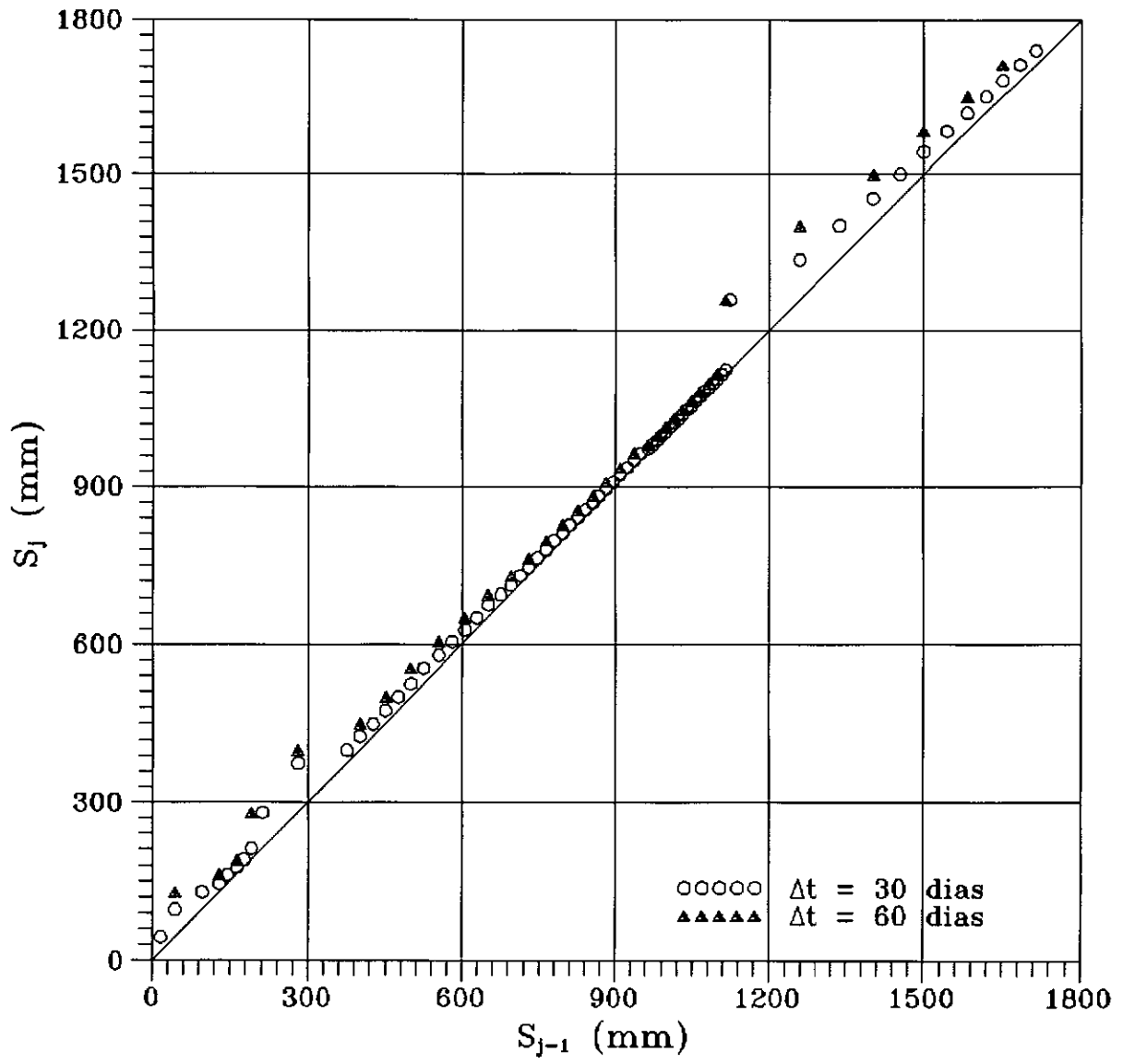


Fig. VI.20 - Construção de Asaoka - seção B - placa R12

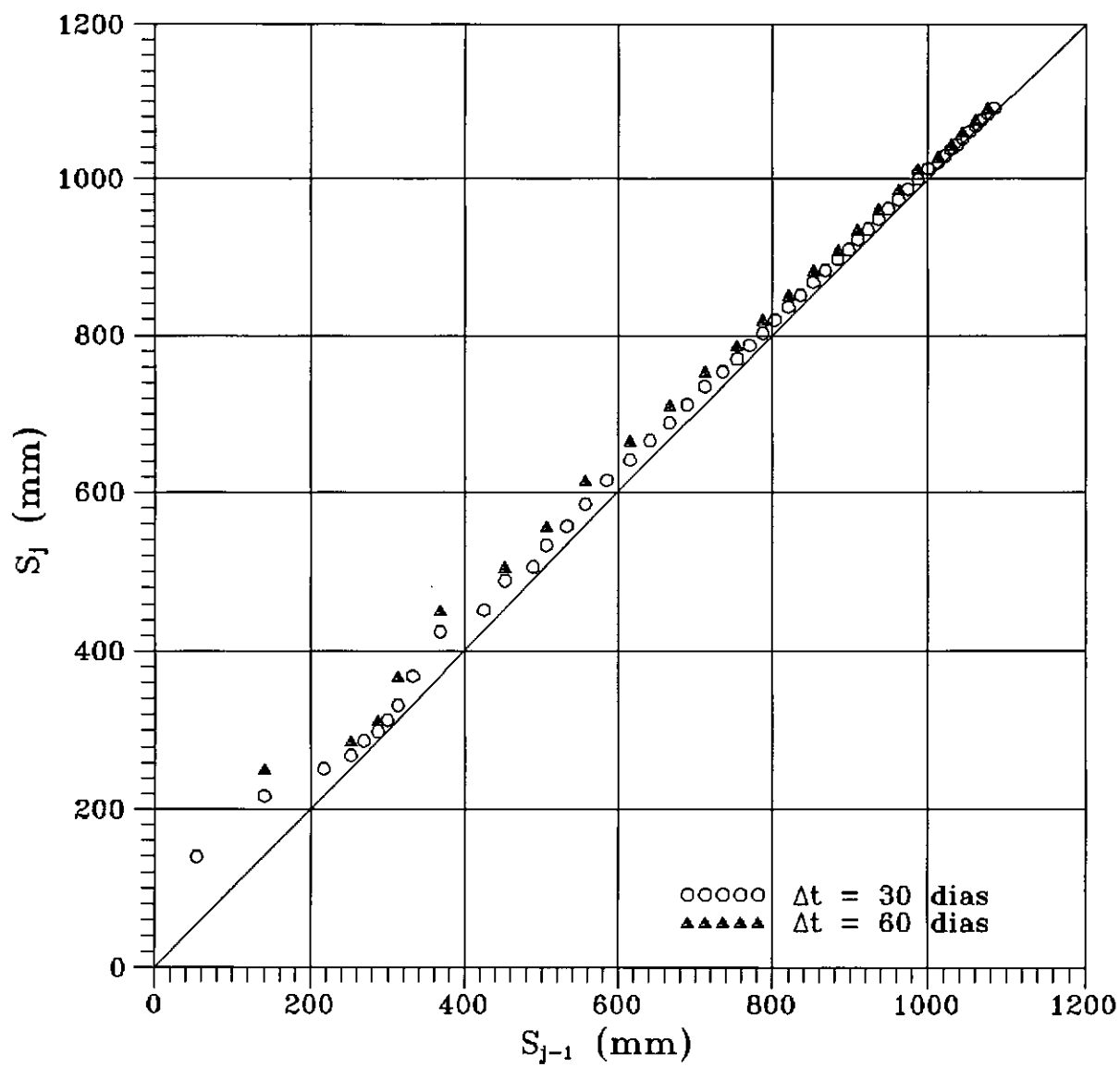


Fig. VI.21 - Construção de Asaoka - seção B - placa R13

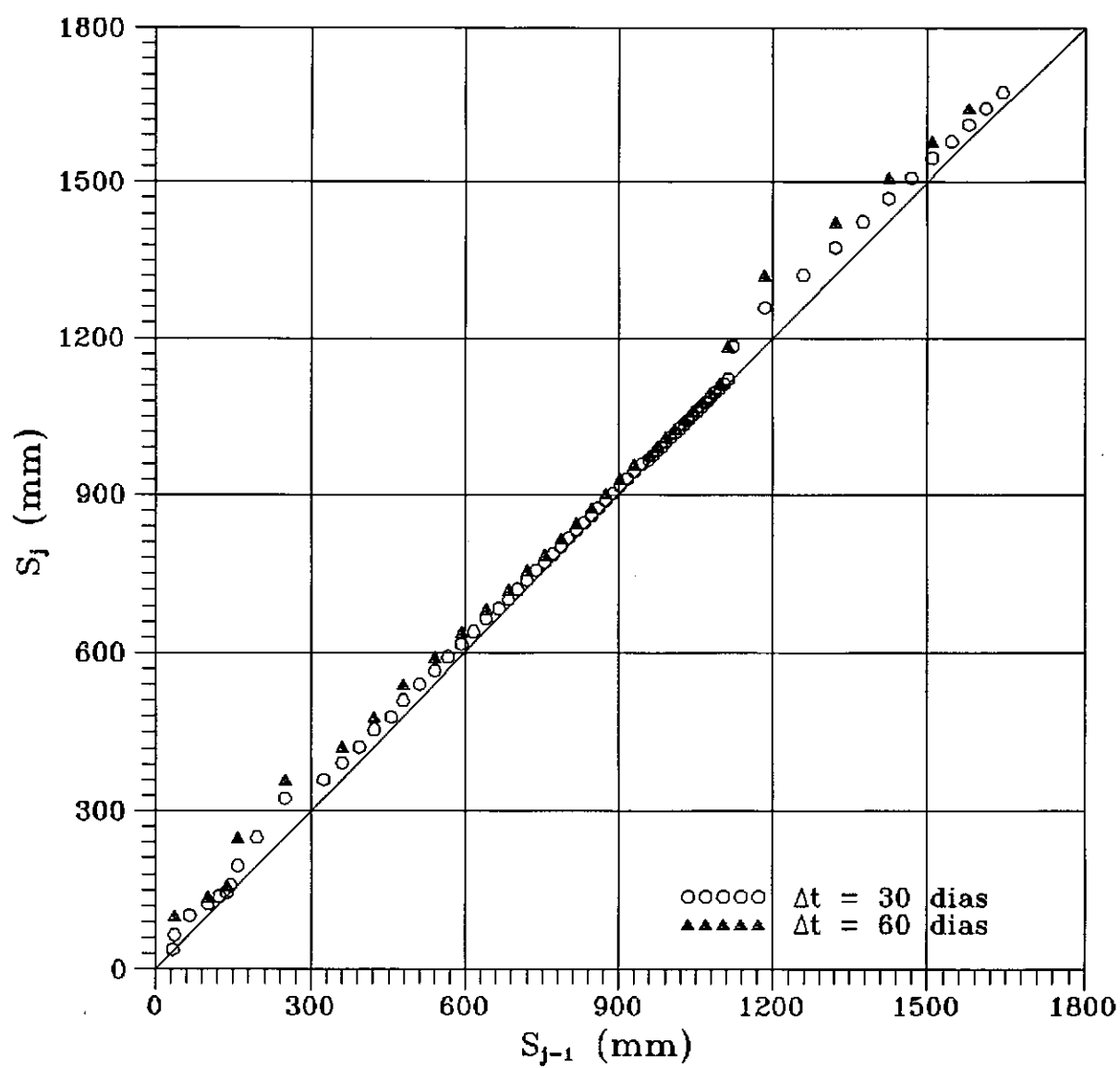


Fig. VI.22 - Construção de Asaoka - seção B - placa R14

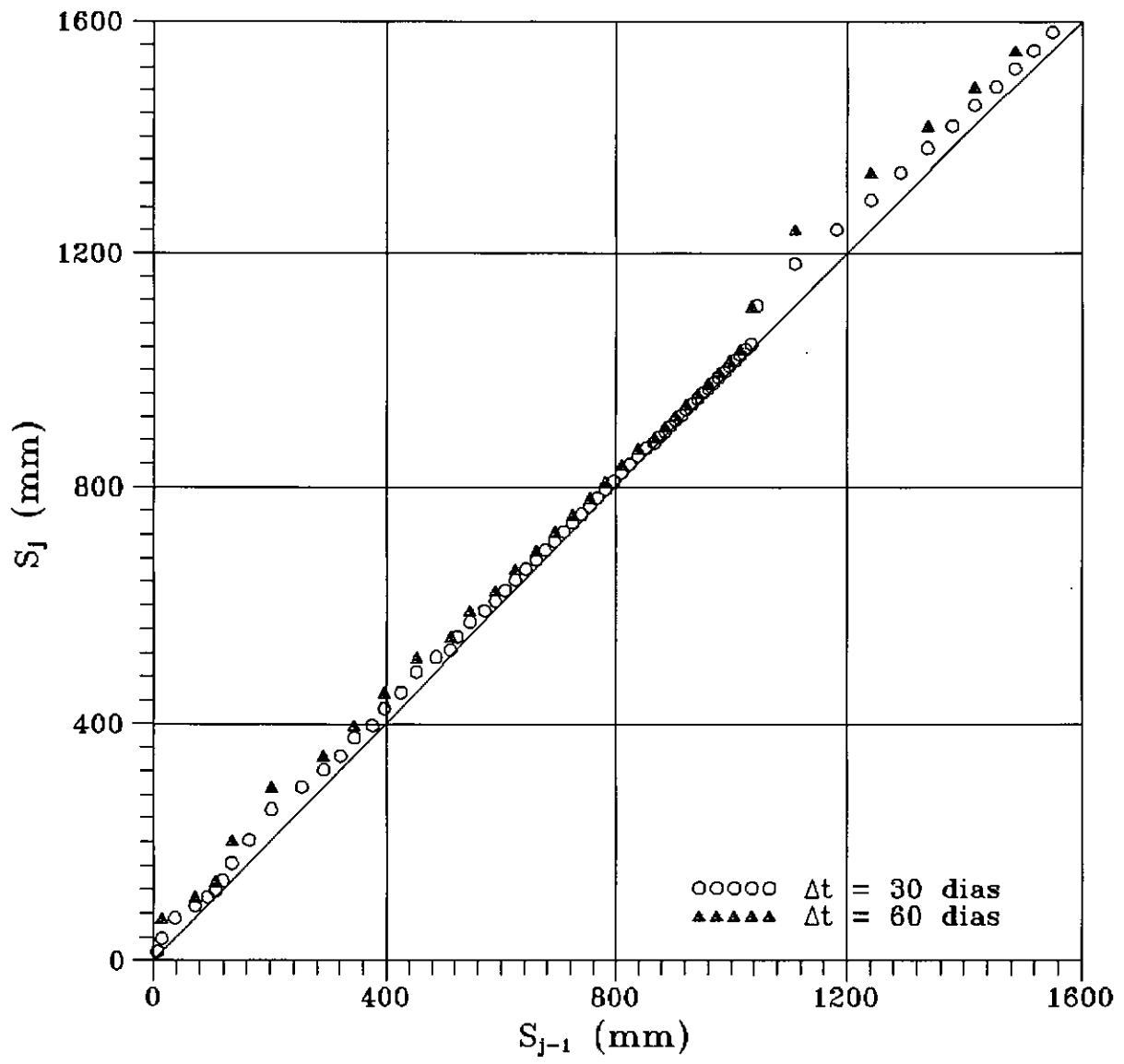


Fig. VI.23 - Construção de Asaoka - seção B - placa R15

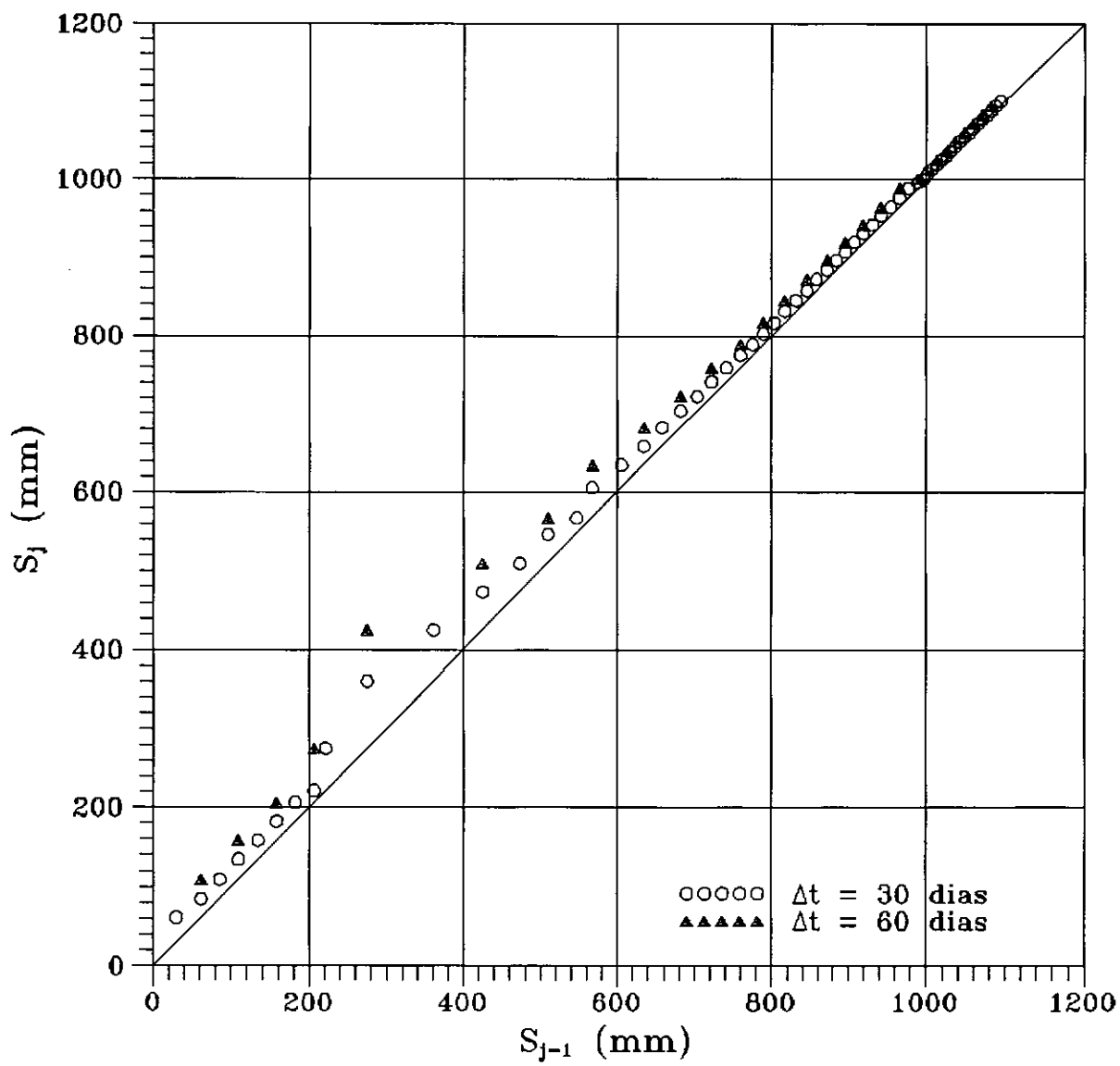


Fig. VI.24 - Construção de Asaoka - seção C - placa R2

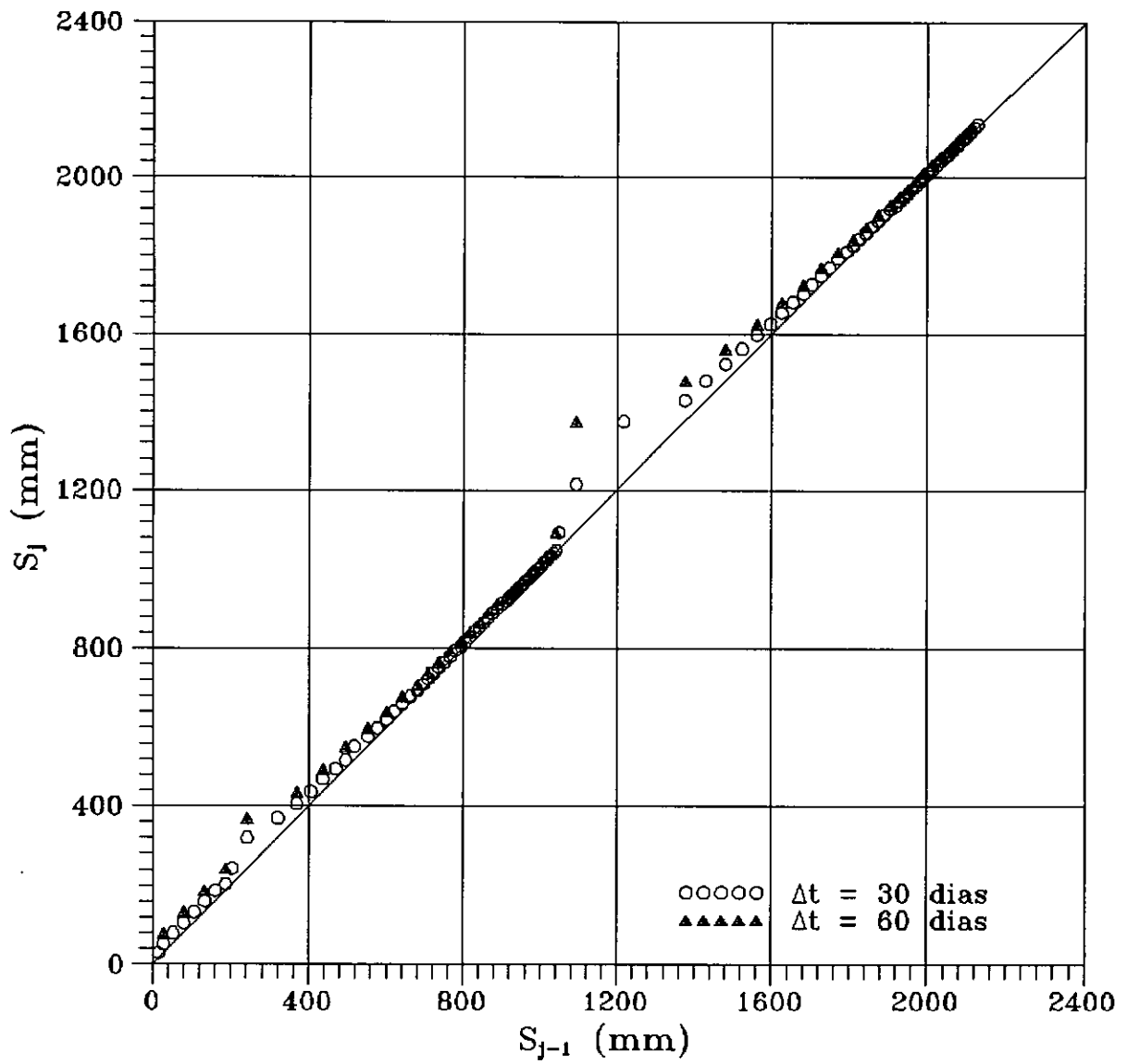


Fig. VI.25 - Construção de Asaoka - seção C - placa R3



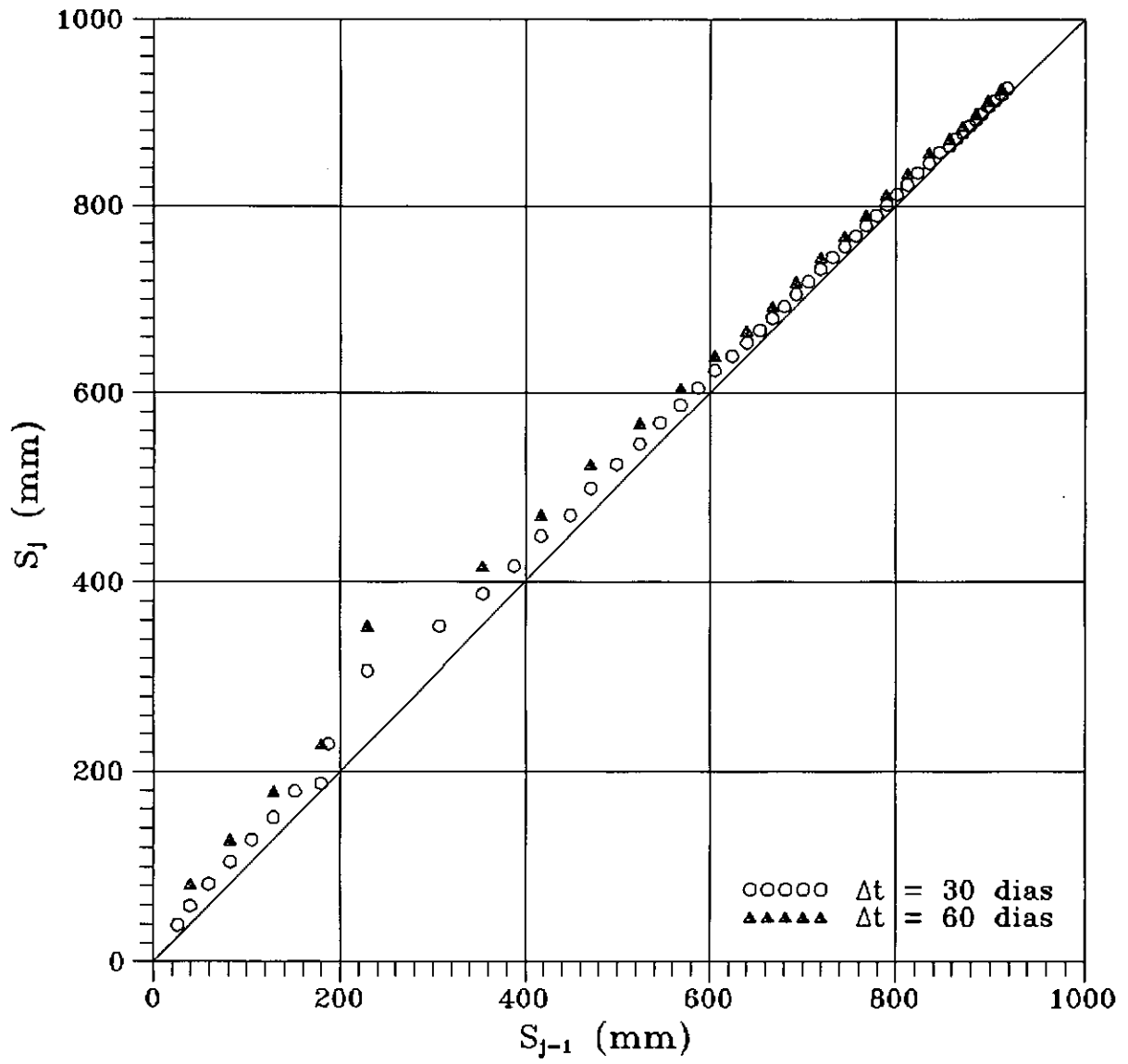


Fig. VI.26 - Construção de Asaoka - seção C - placa R4

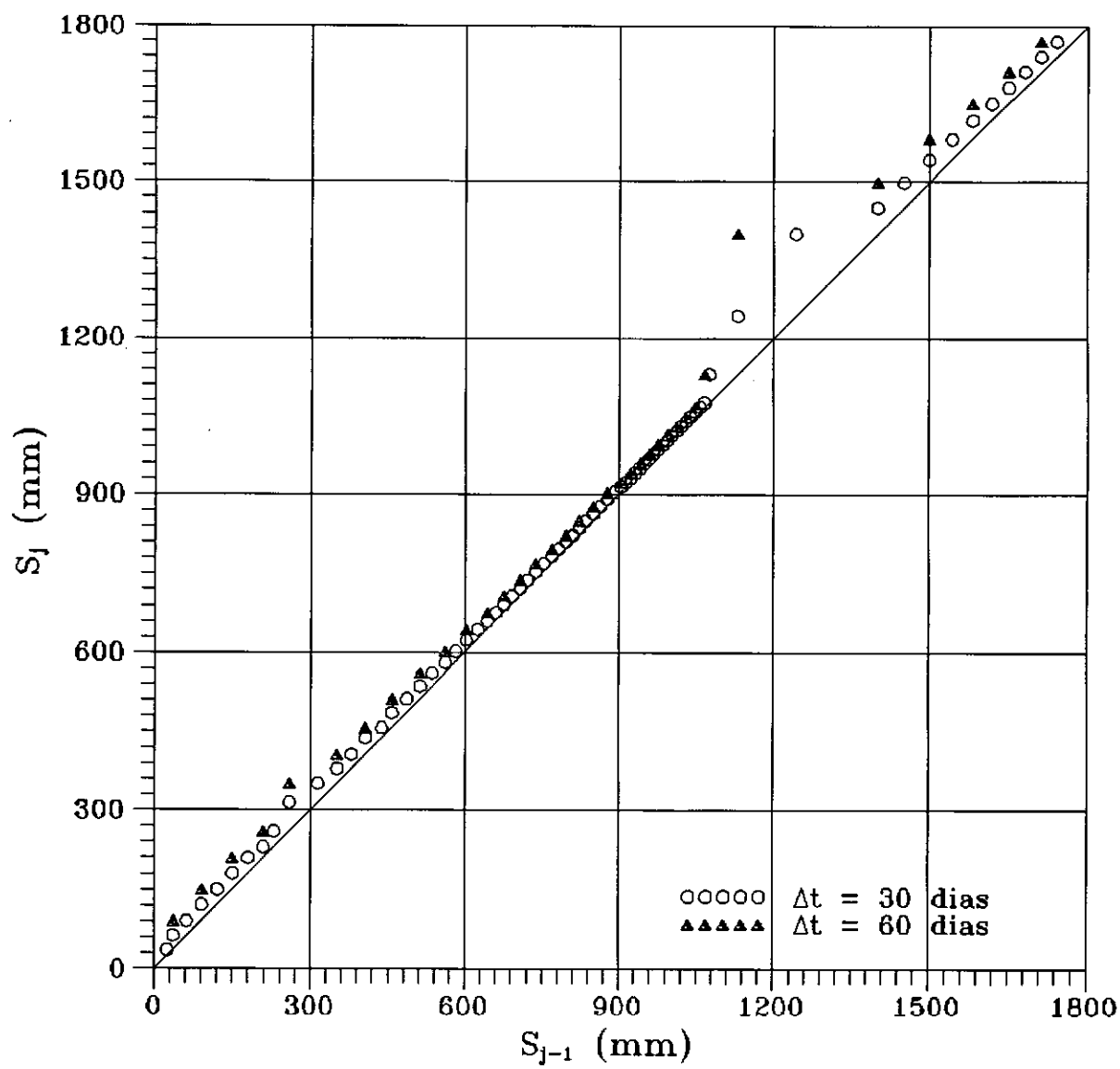


Fig. VI.27 - Construção de Asaoka - seção C - placa R11

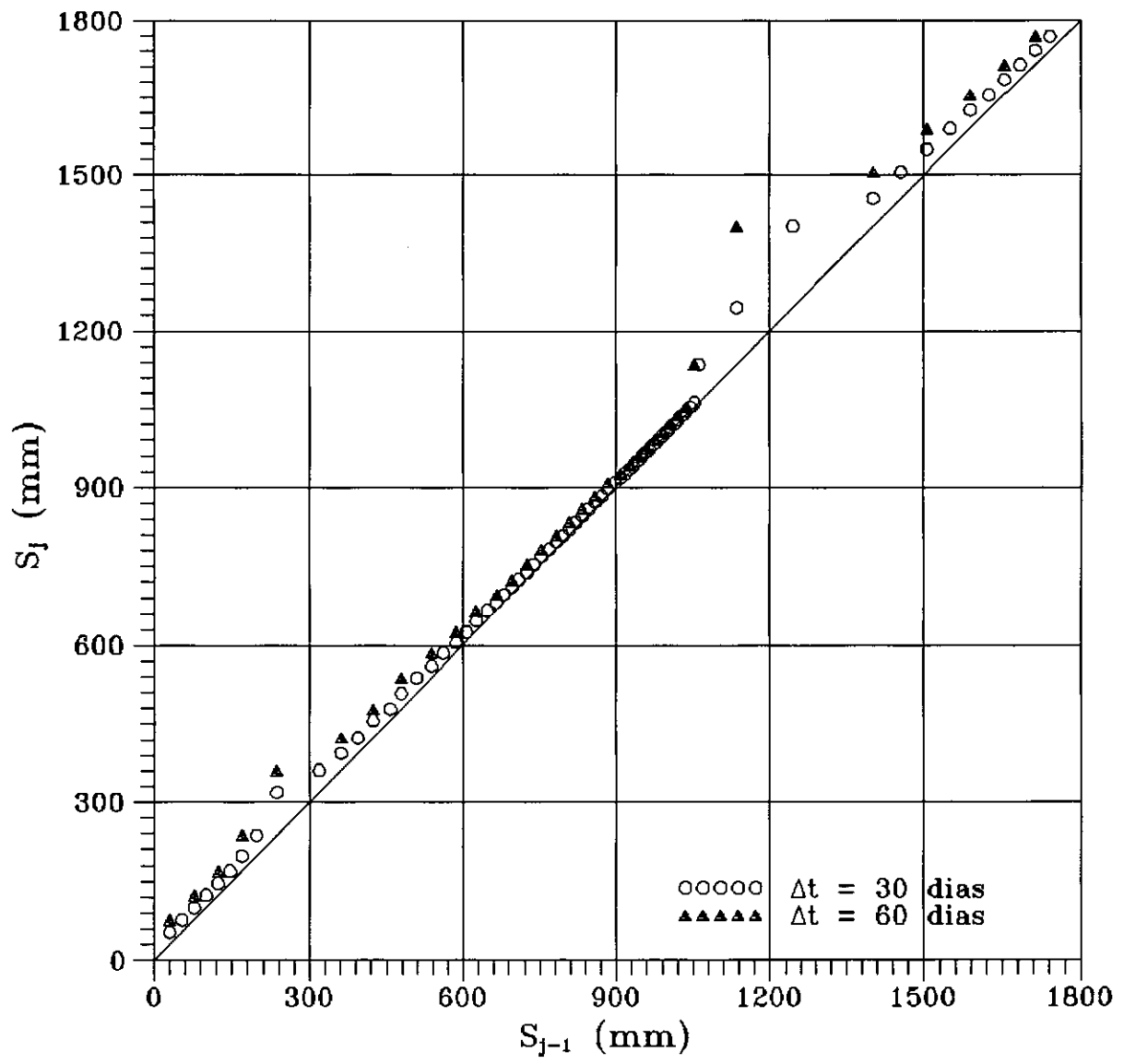


Fig. VI.28 - Construção de Asaoka - seção C - placa R12

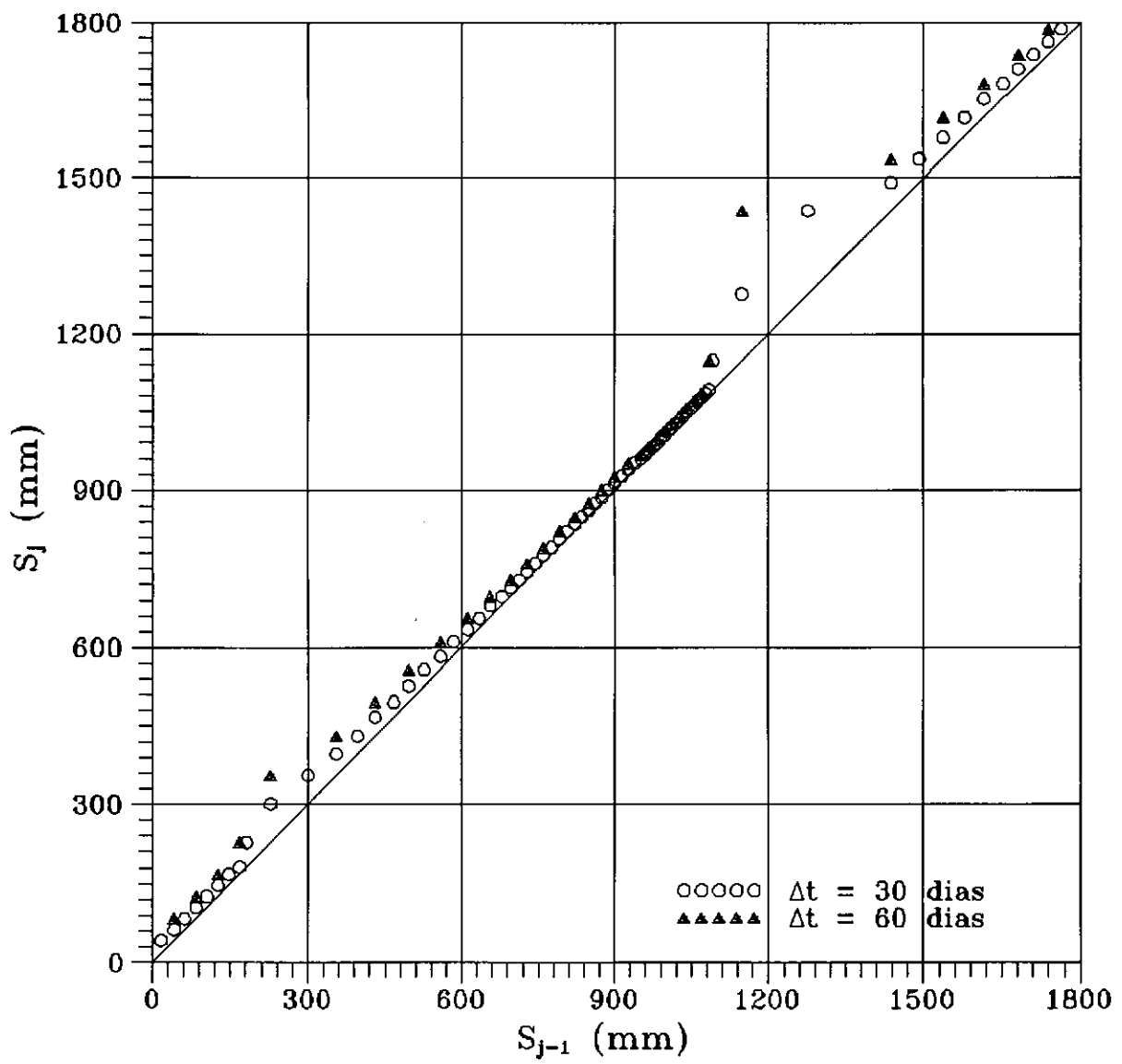


Fig VI.29 - Construção de Asaoka - seção C - placa R13

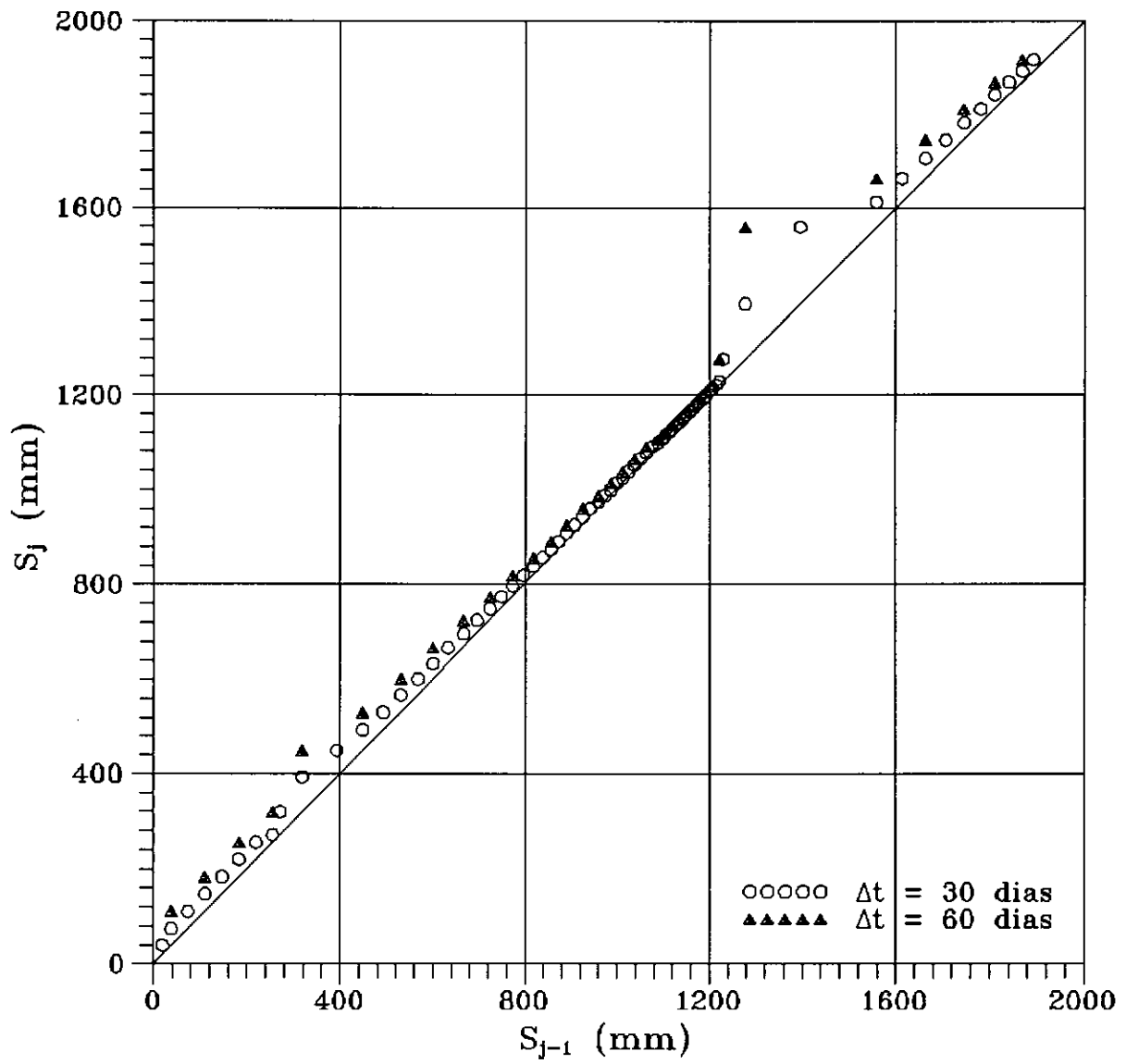


Fig. VI.30 - Construção de Asaoka - seção C - placa R14

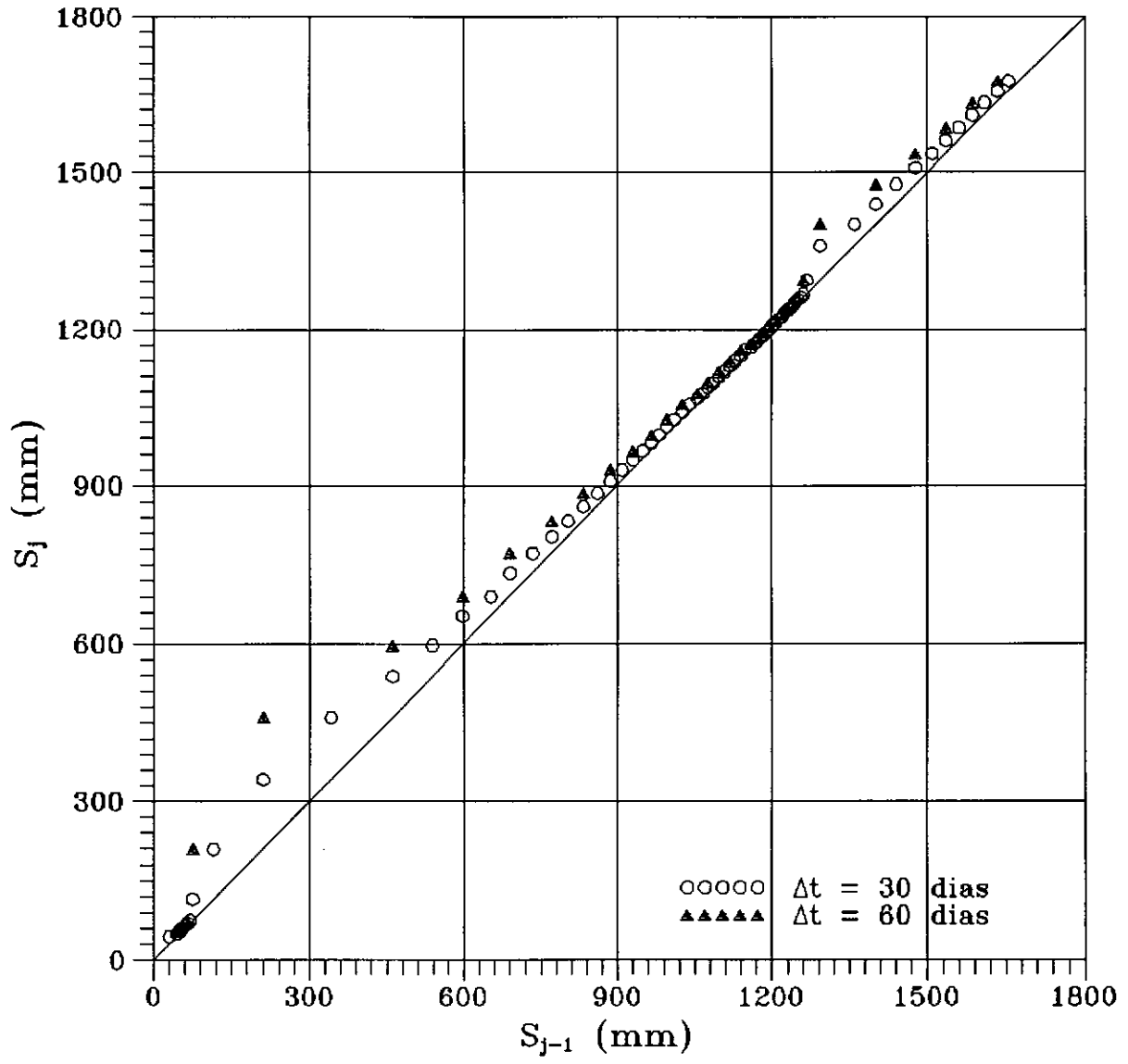


Fig. VI.31 - Construção de Asaoka - seção D - placa R2

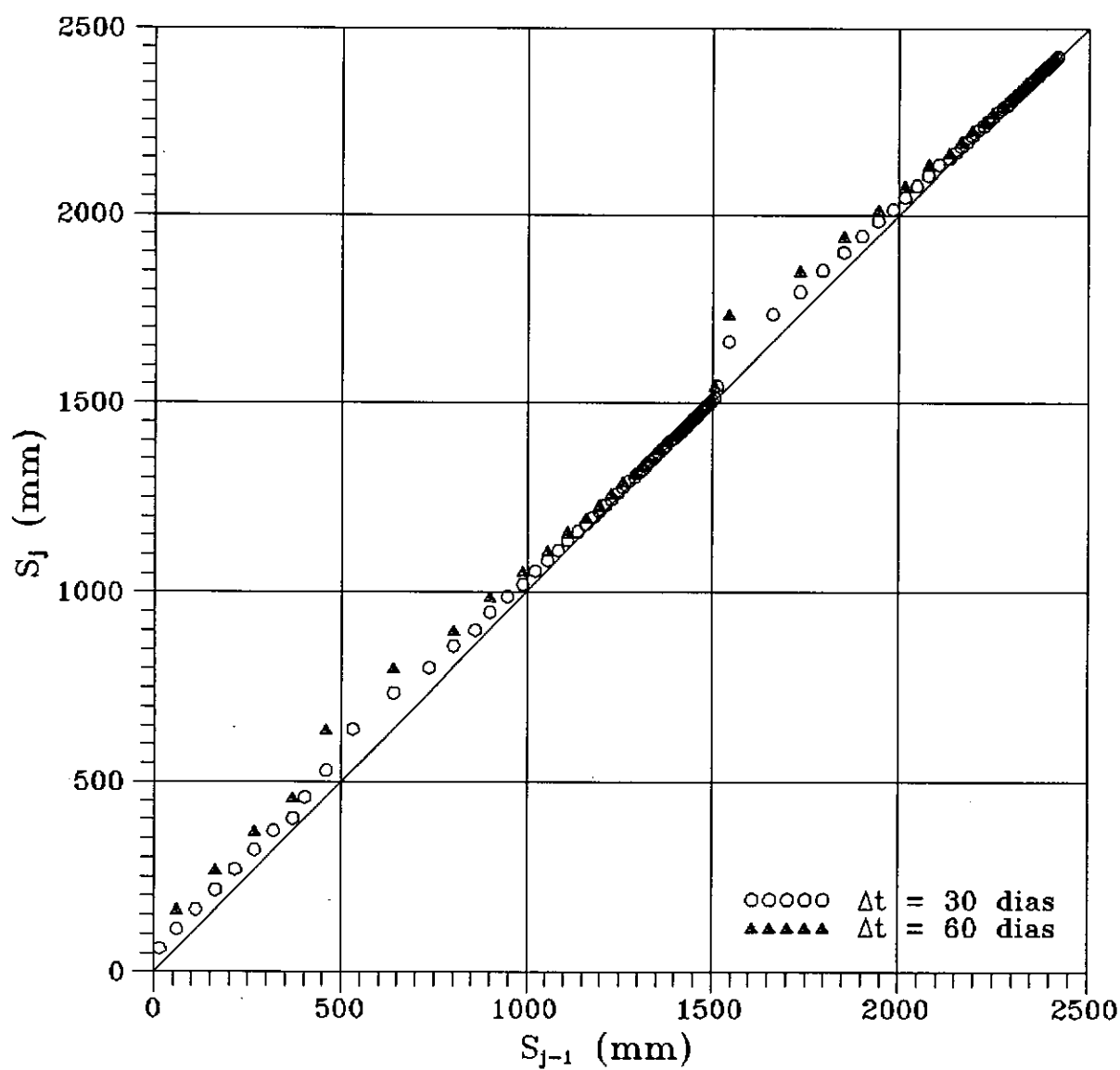


Fig. VI.32 - Construção de Asaoka - seção D - placa R3

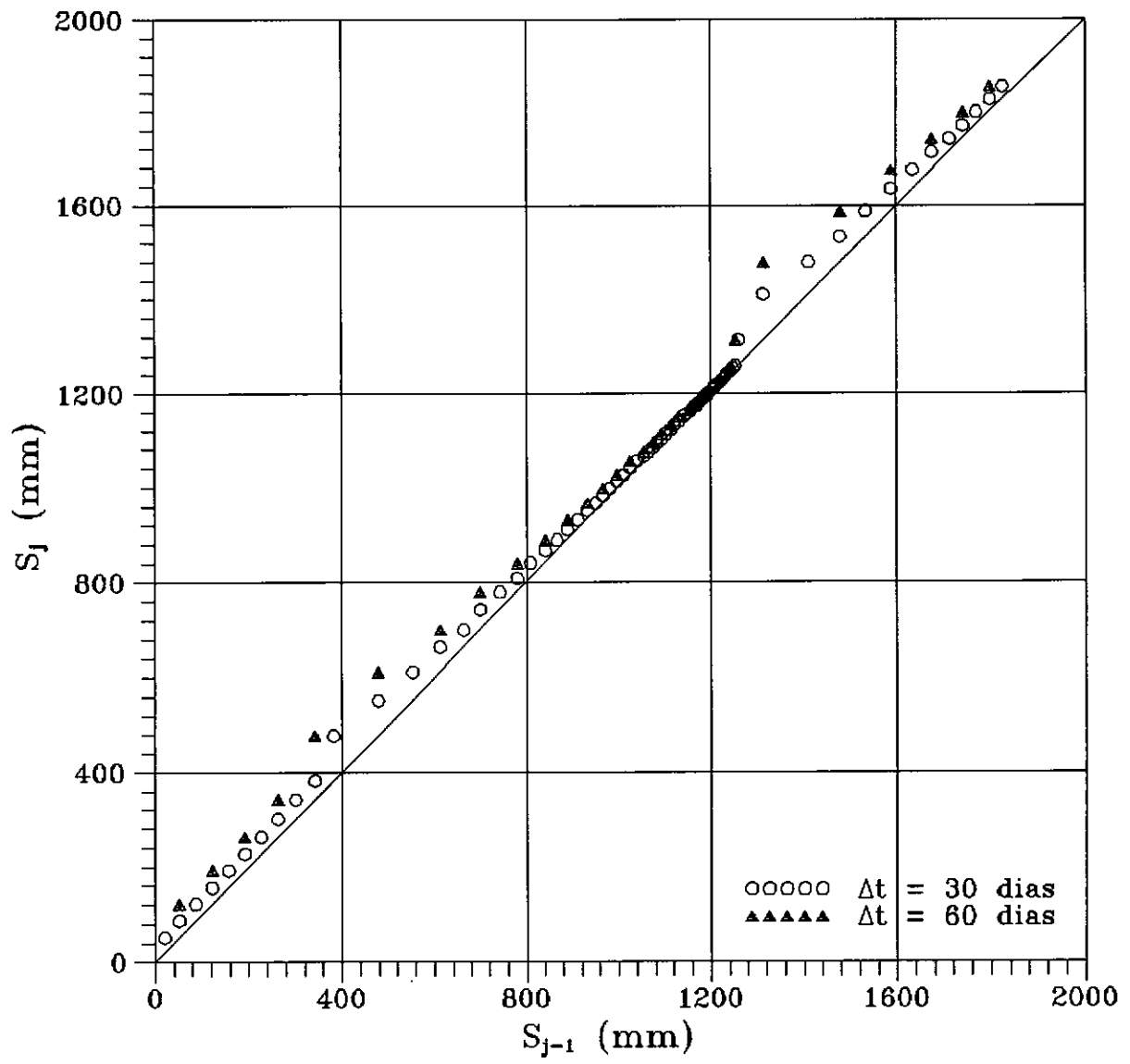


Fig. VI.33 - Construção de Asaoka - seção D - placa R4



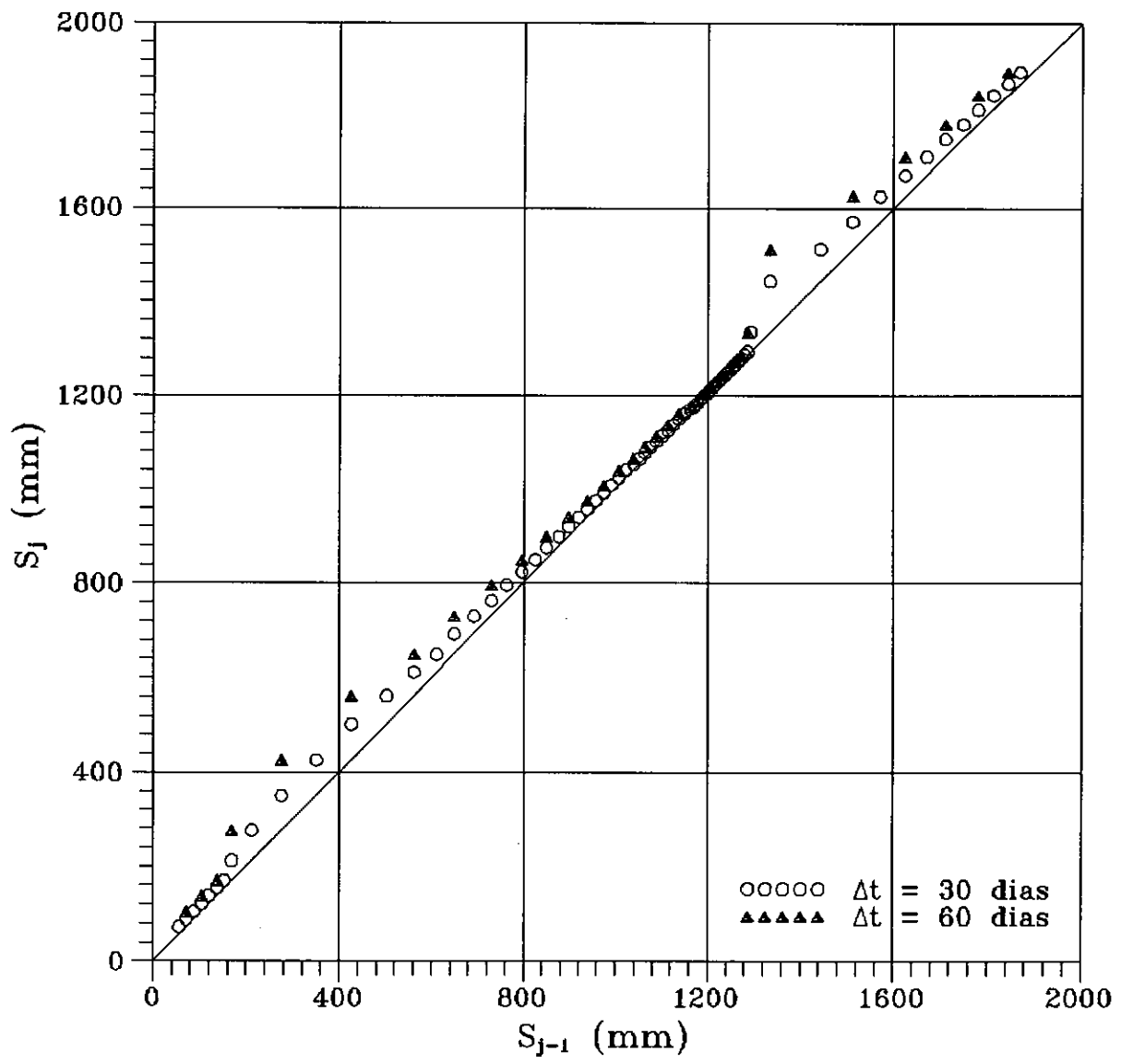


Fig. VI.34 - Construção de Asaoka - seção D - placa R11

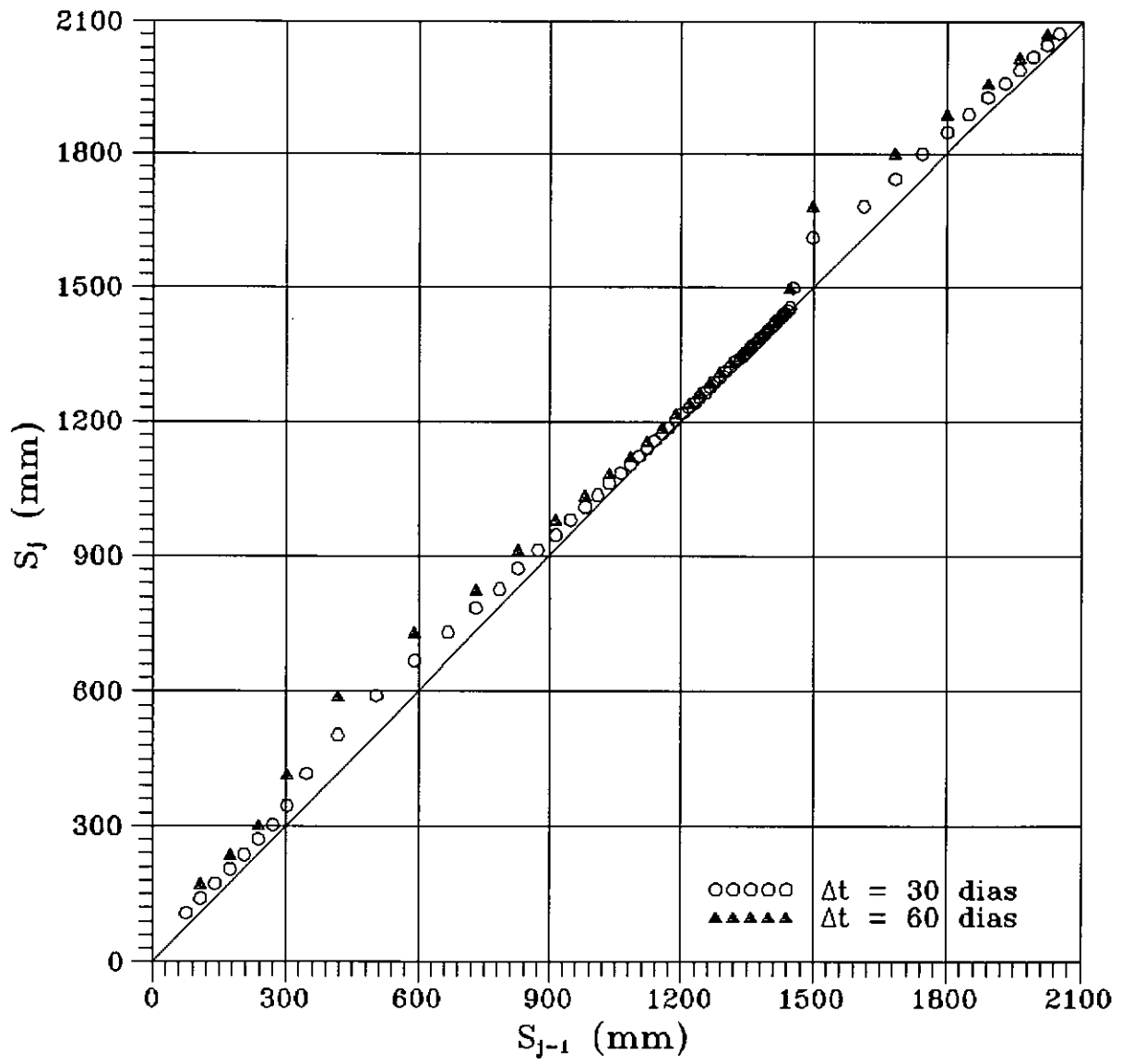


Fig. VI.35 - Construção de Asaoka - seção D - placa R12

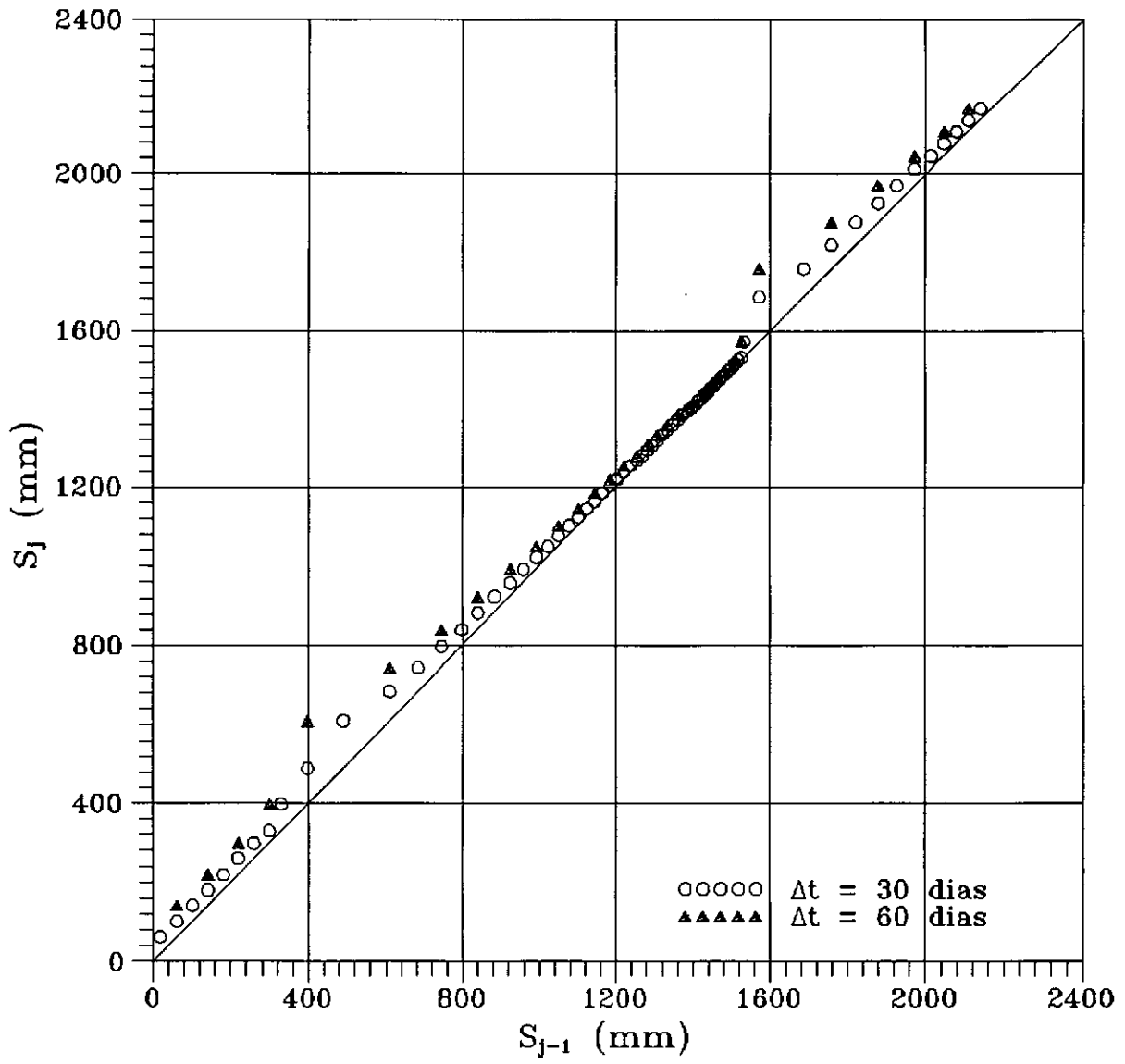


Fig. VI.36 - Construção de Asaoka - seção D - placa R13

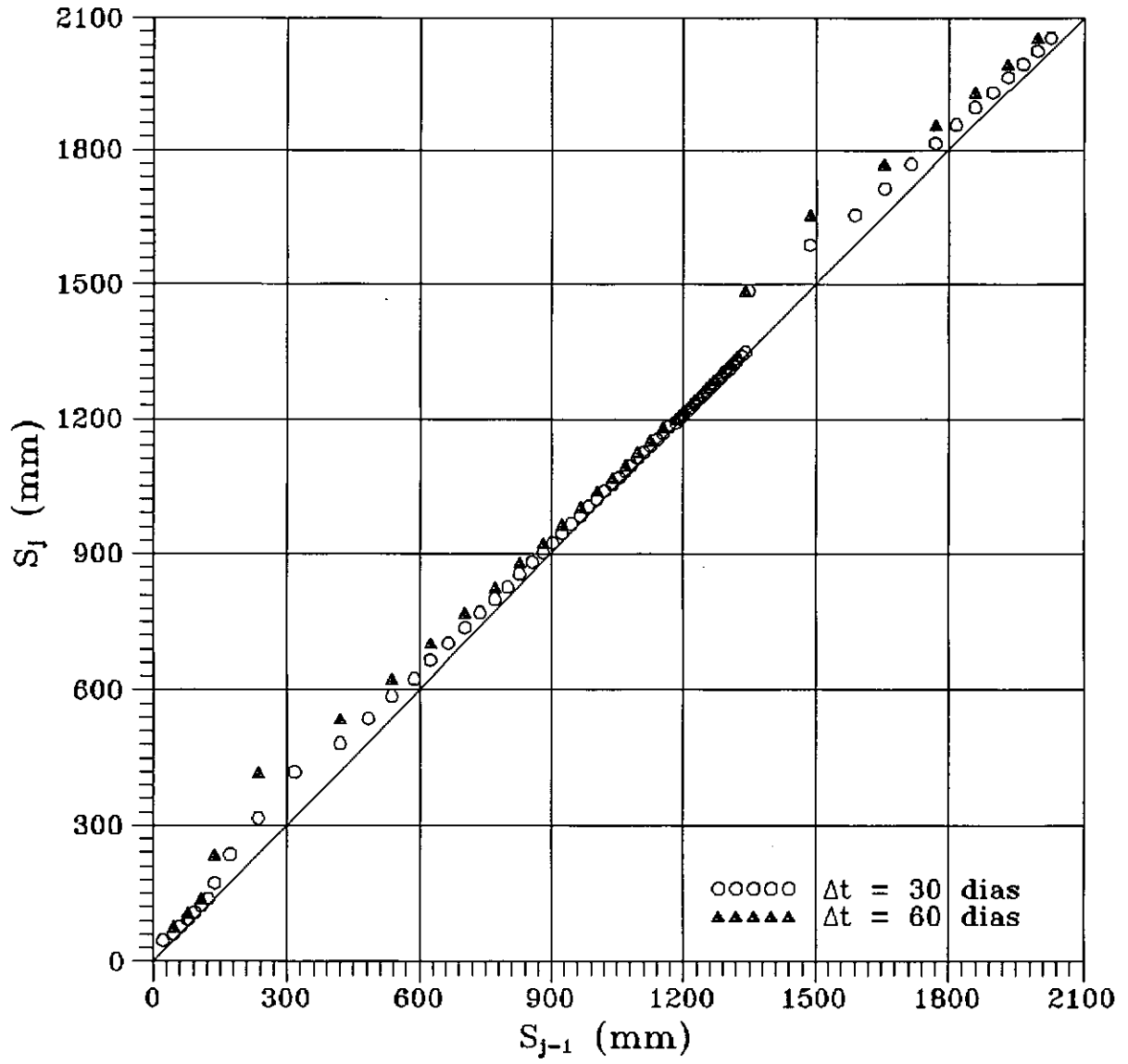


Fig. VI.37 - Construção de Asaoka - seção D - placa R14

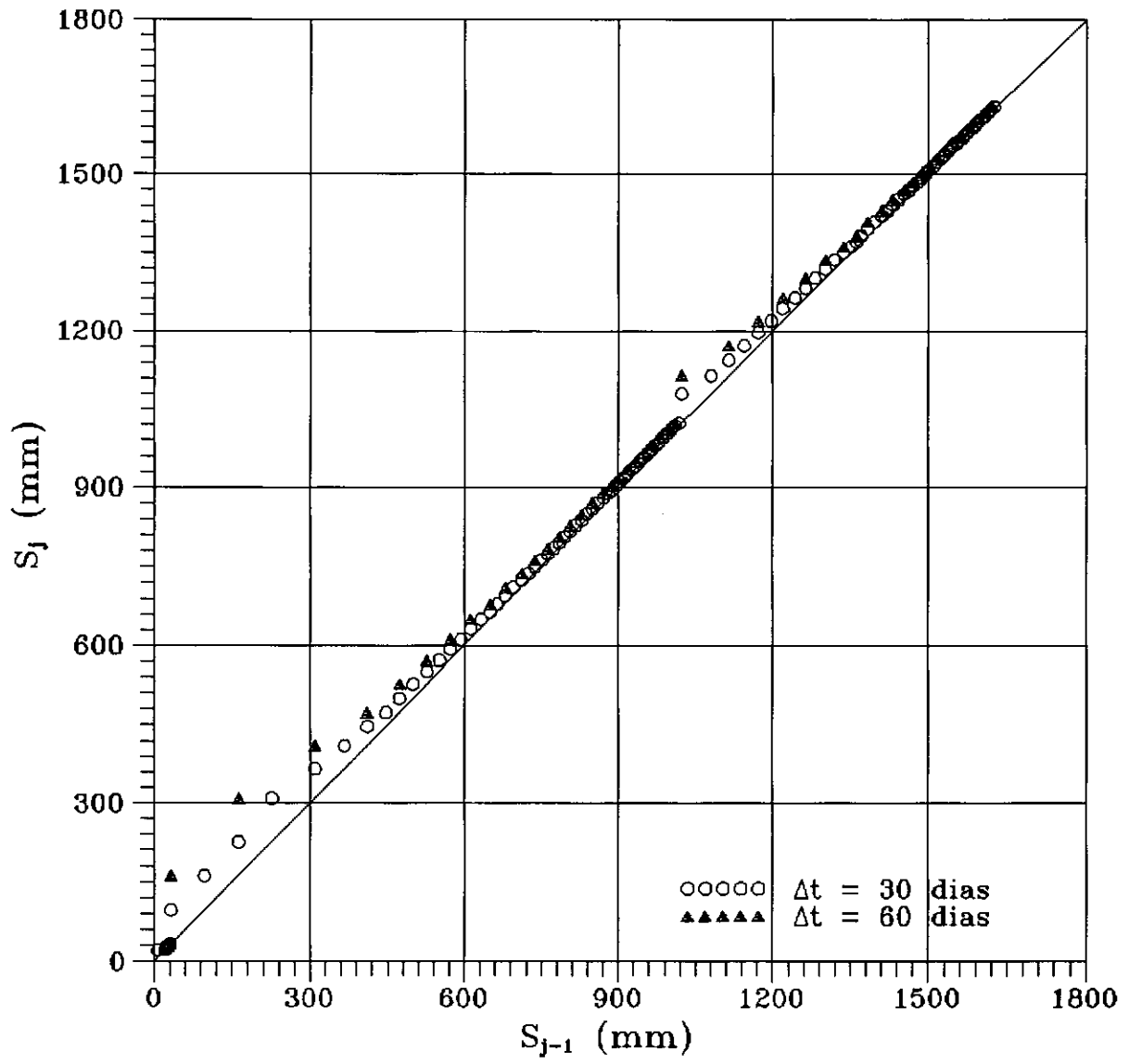


Fig. VI.38 - Construção de Asaoka - seção E - placa R2

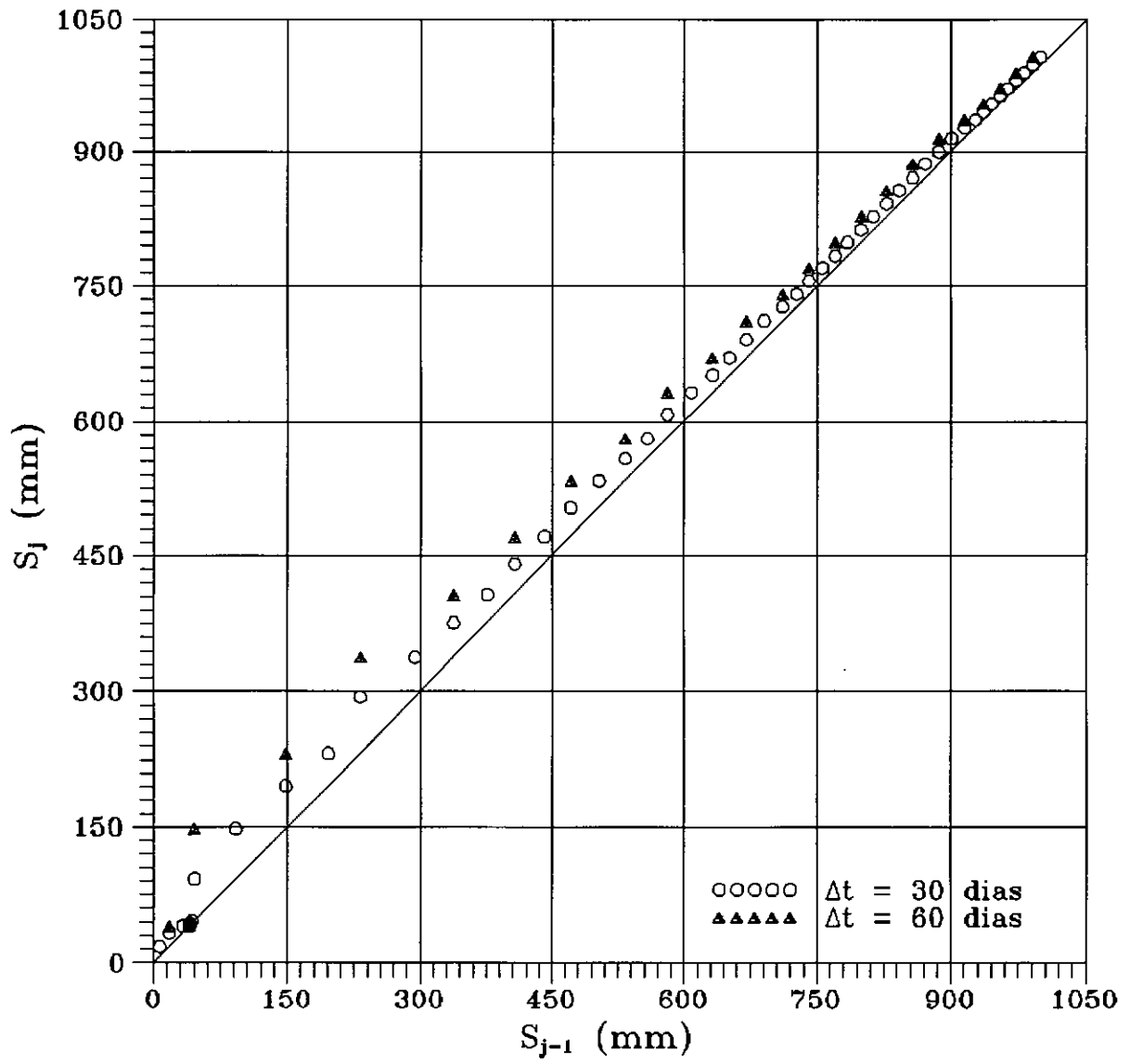


Fig. VI.39 - Construção de Asaoka - seção E - placa R3

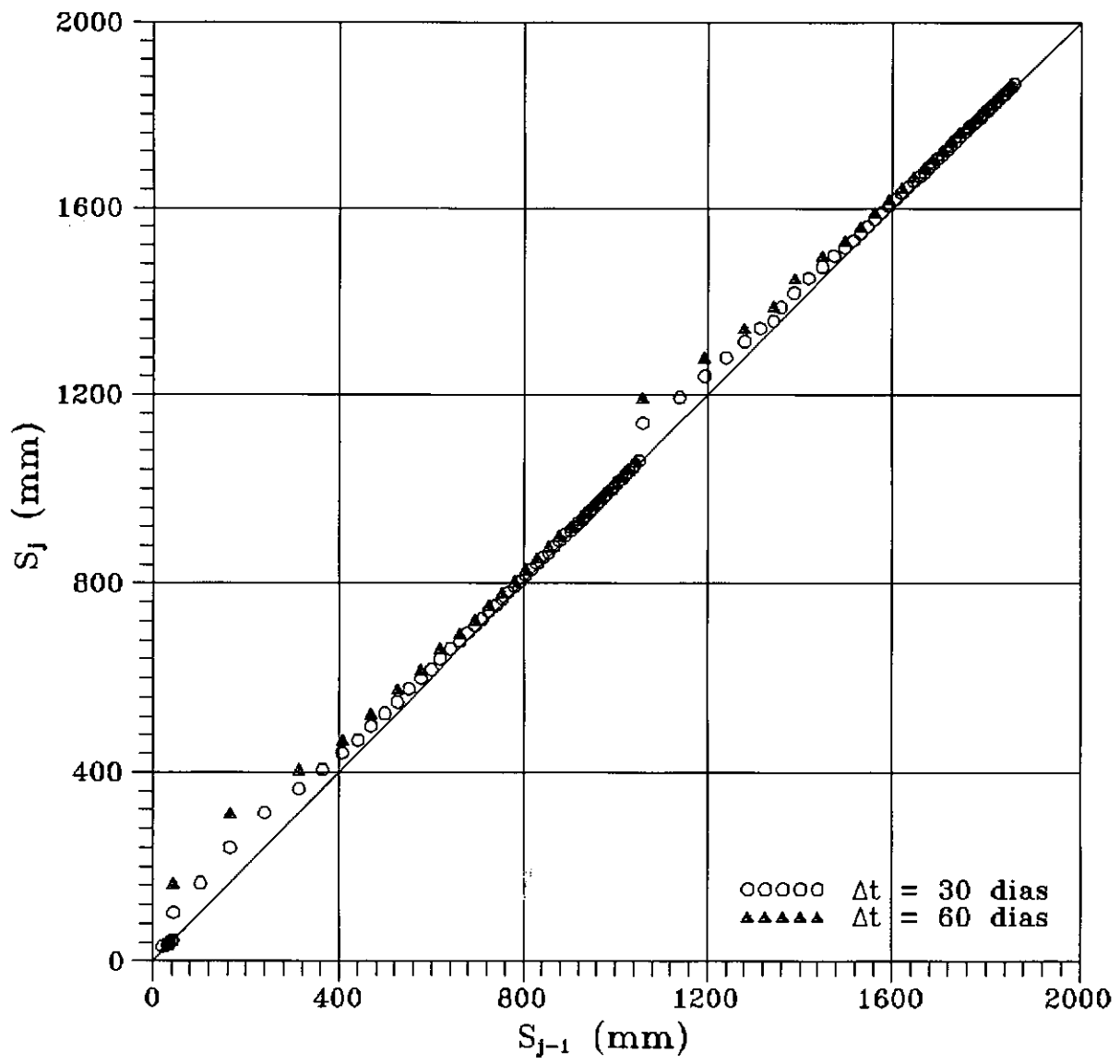


Fig. VI.40 - Construção de Asaoka - seção E - placa R4

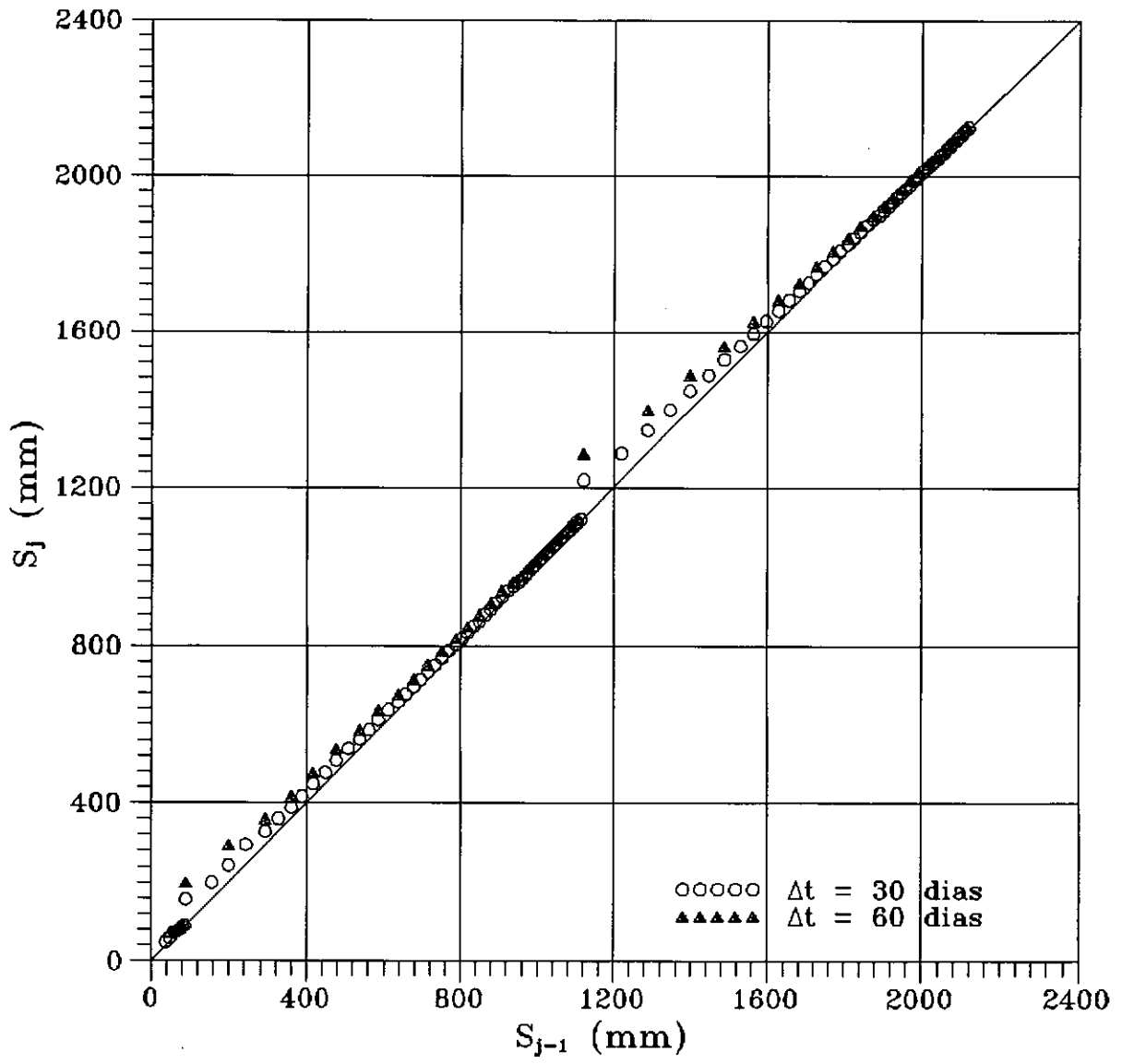


Fig. VI.41 - Construção de Asaoka - seção E - placa R11



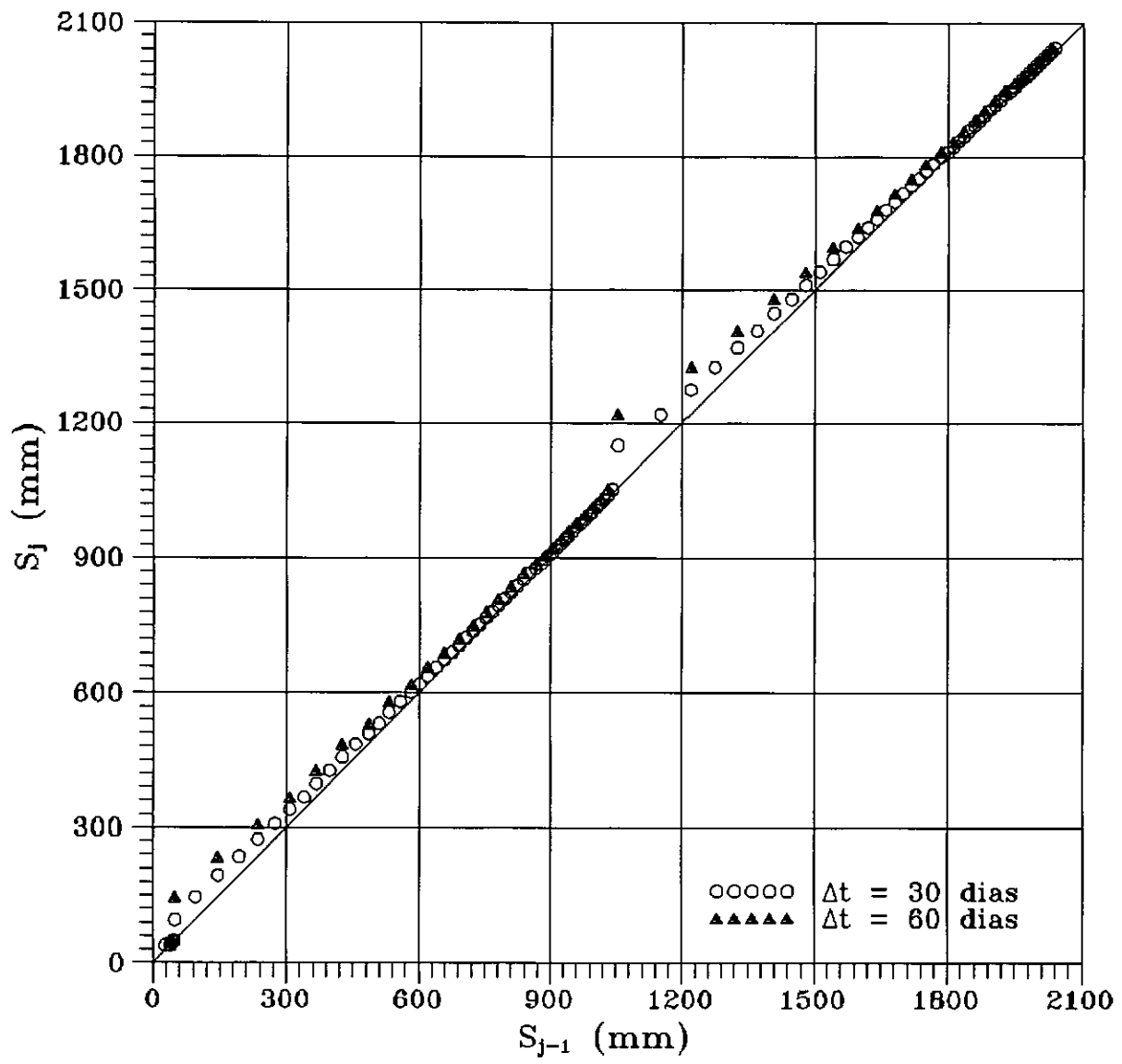


Fig. VI.42 - Construção de Asaoka - seção E - placa R12

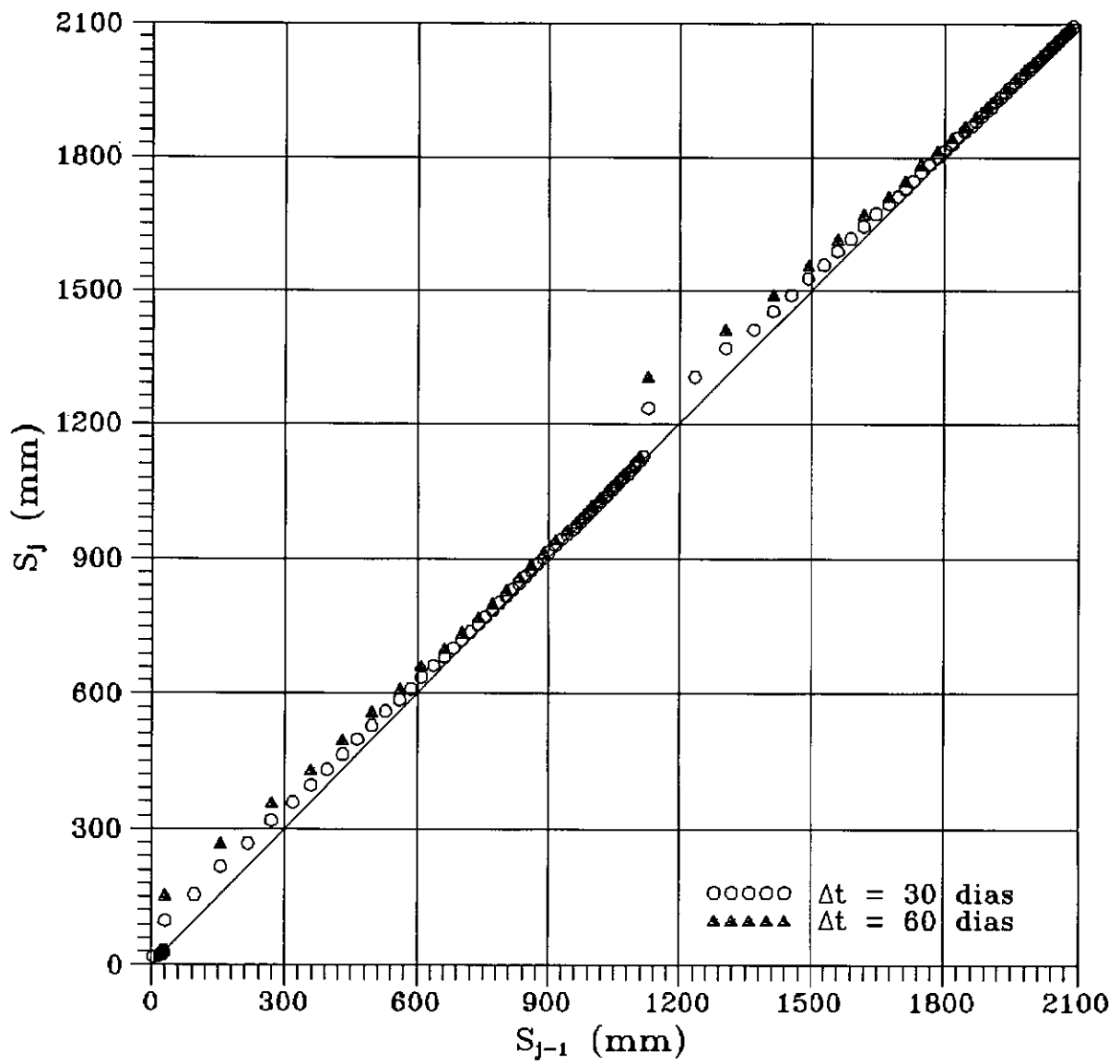


Fig. VI.43 - Construção de Asaoka - seção E - placa R13

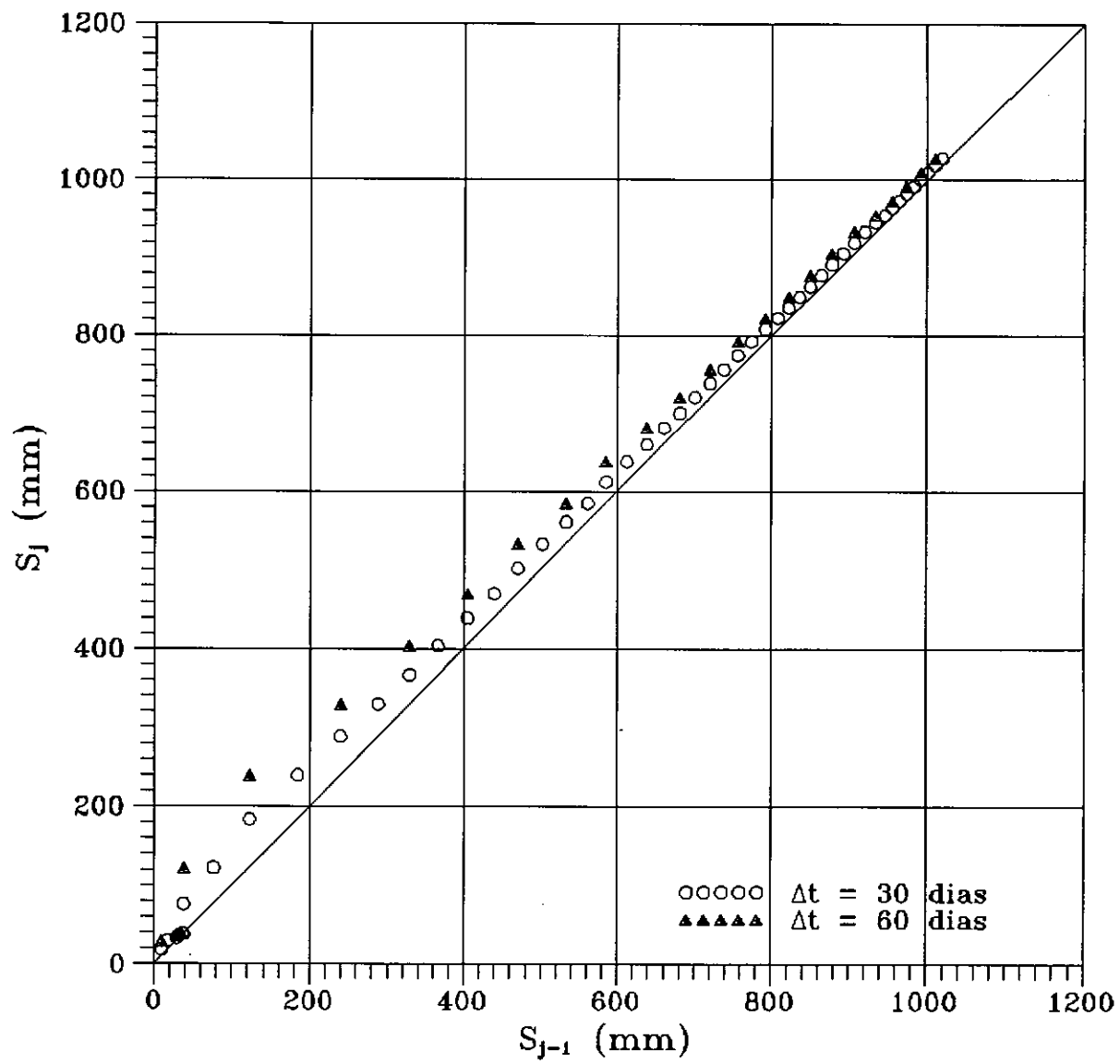


Fig. VI.44 - Construção de Asaoka - seção E - placa R14

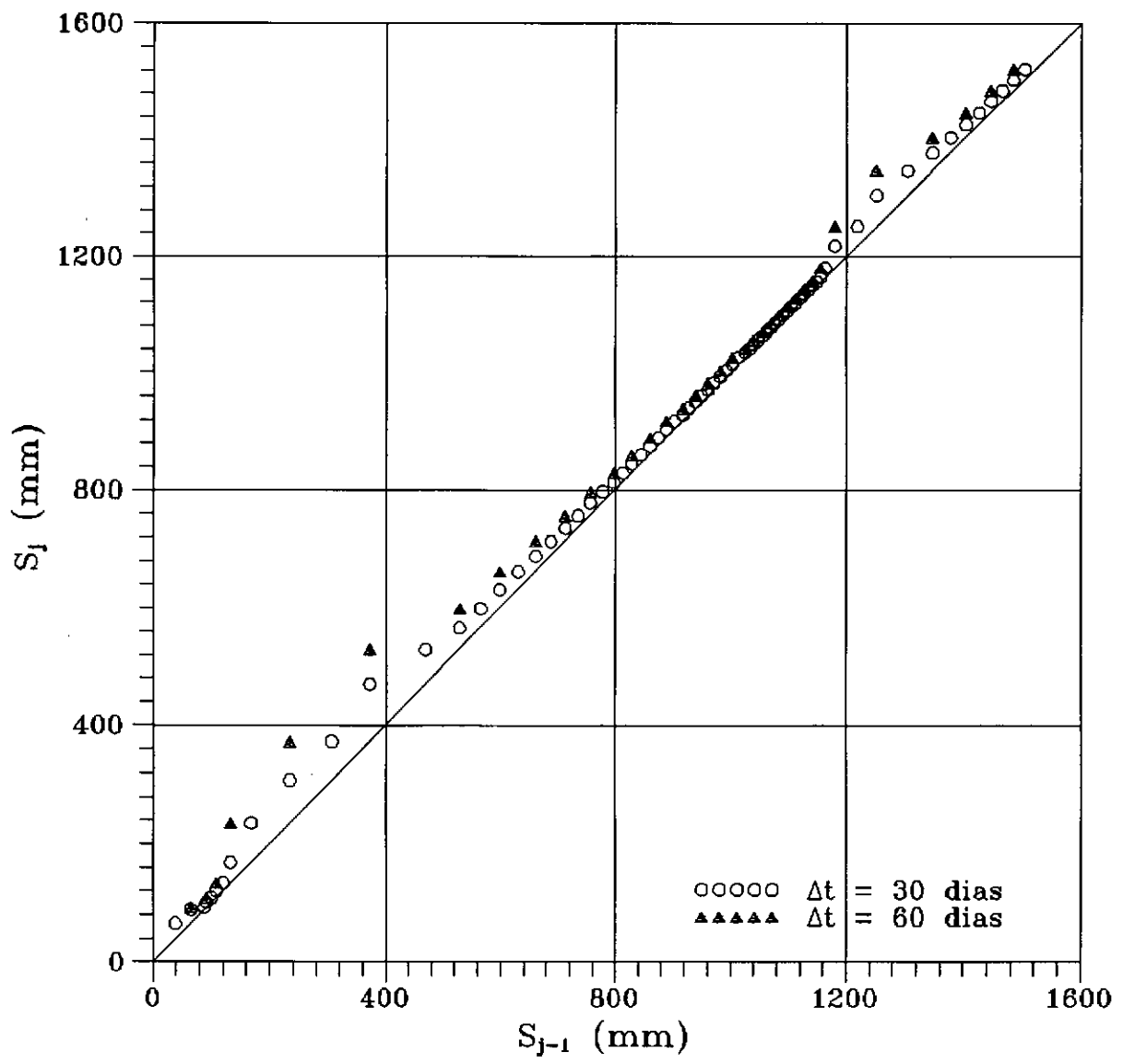


Fig. VI.45 - Construção de Asaoka - seção F - placa R2

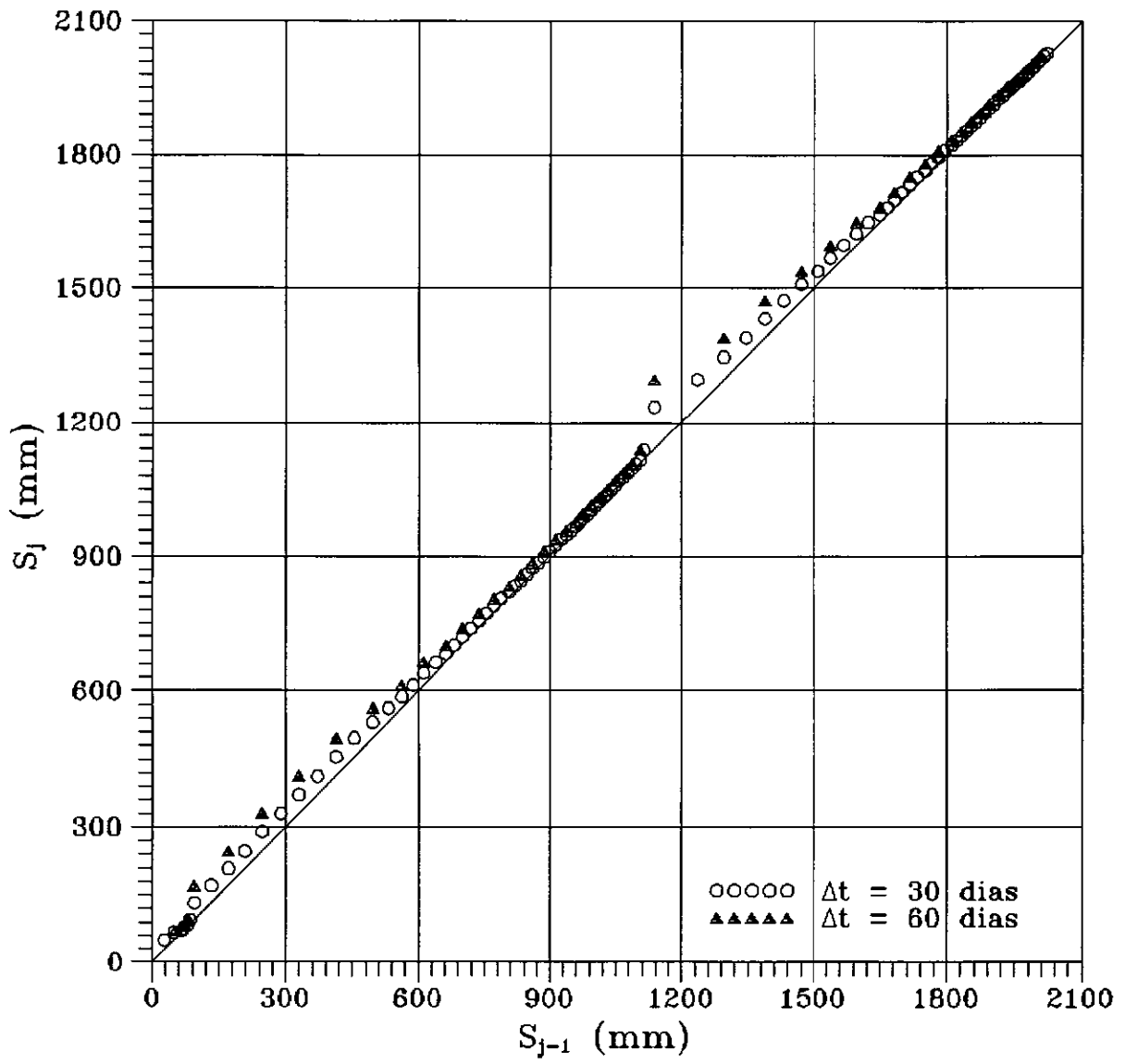


Fig. VI.46 - Construção de Asaoka - seção F - placa R3

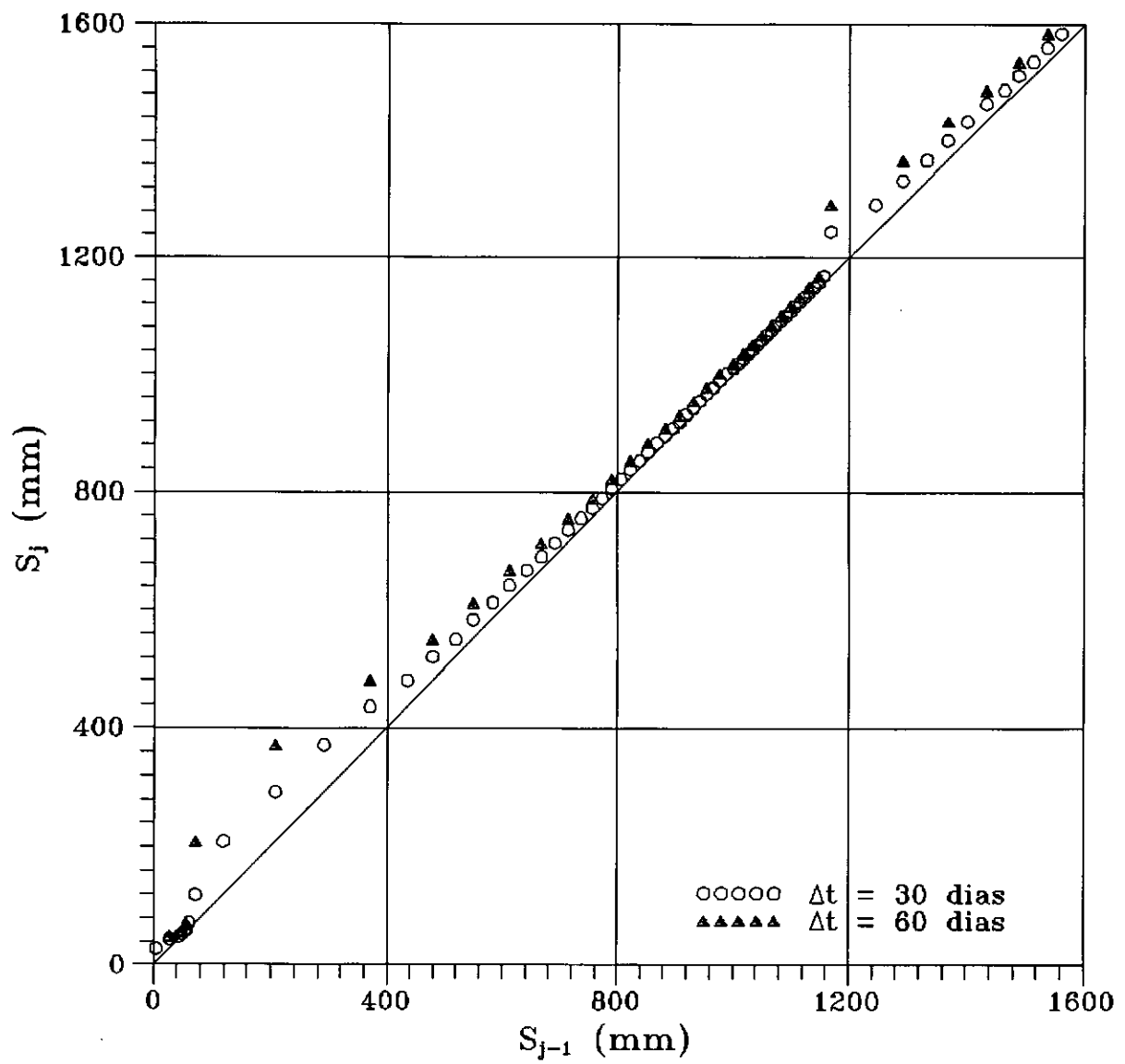


Fig. VI.47 - Construção de Asaoka - seção F - placa R4

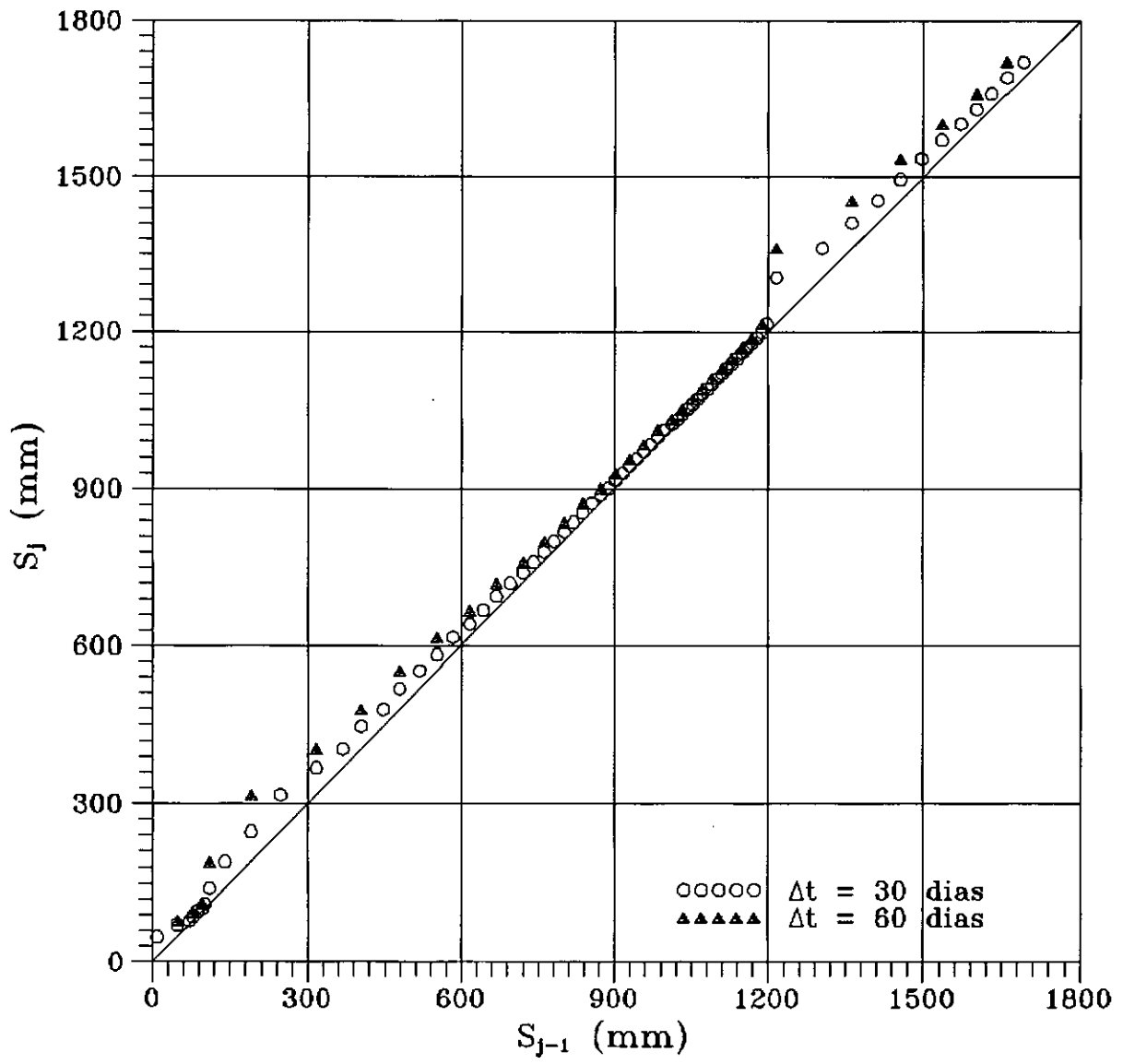


Fig. VI.48 - Construção de Asaoka - seção F - placa R11

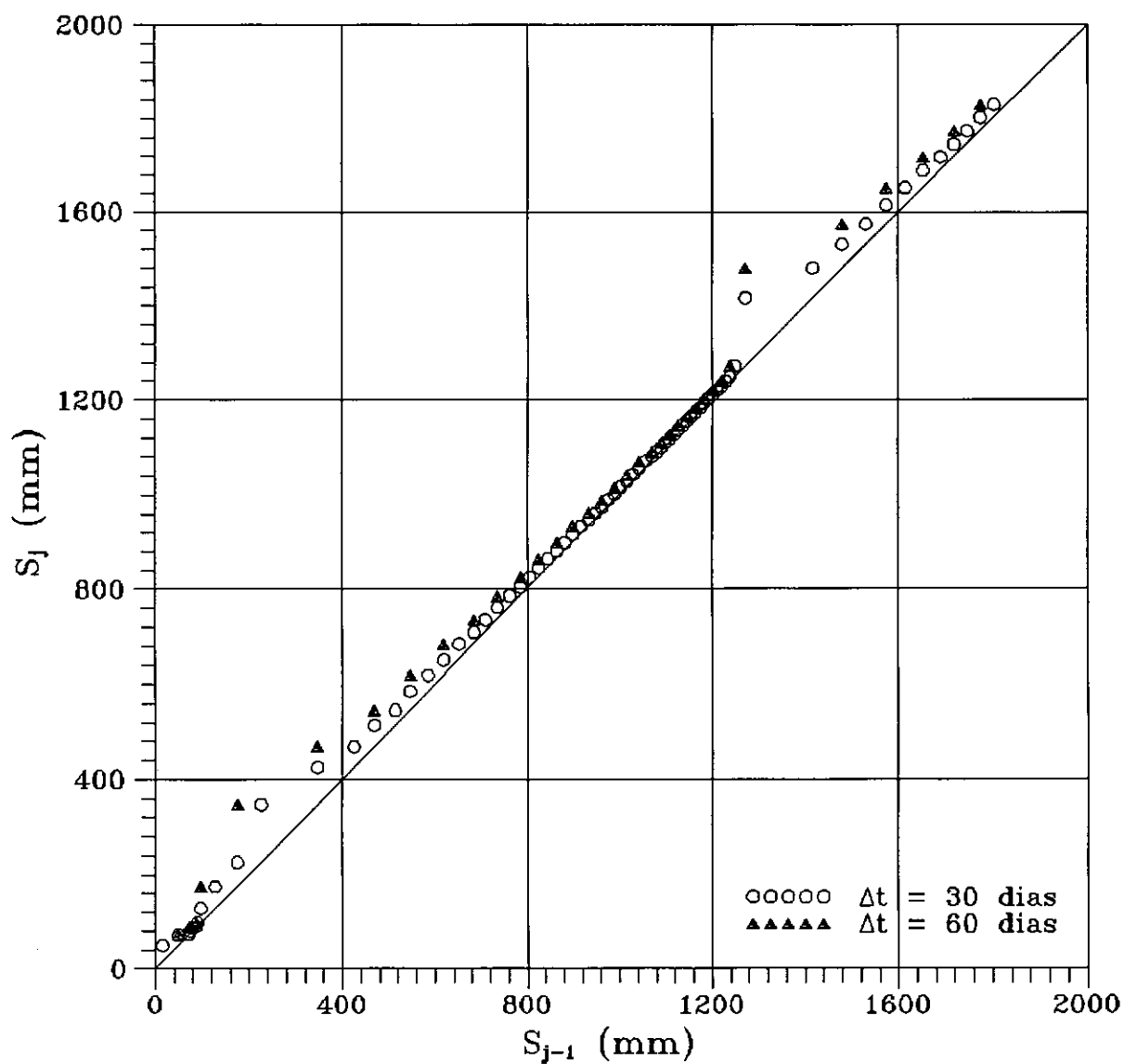


Fig. VI.49 - Construção de Asaoka - seção F - placa R12



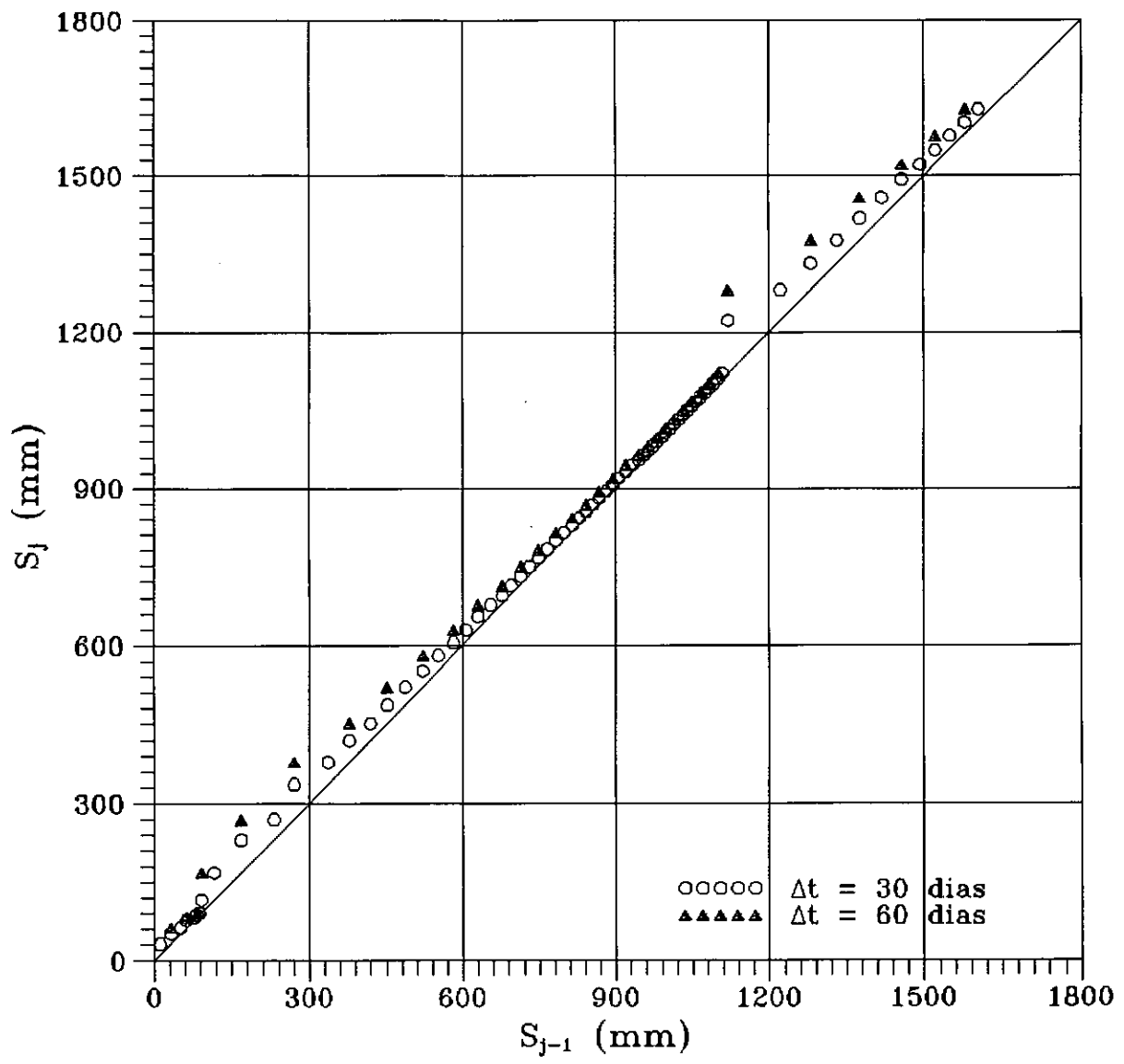


Fig. VI.50 - Construção de Asaoka - seção F - placa R13

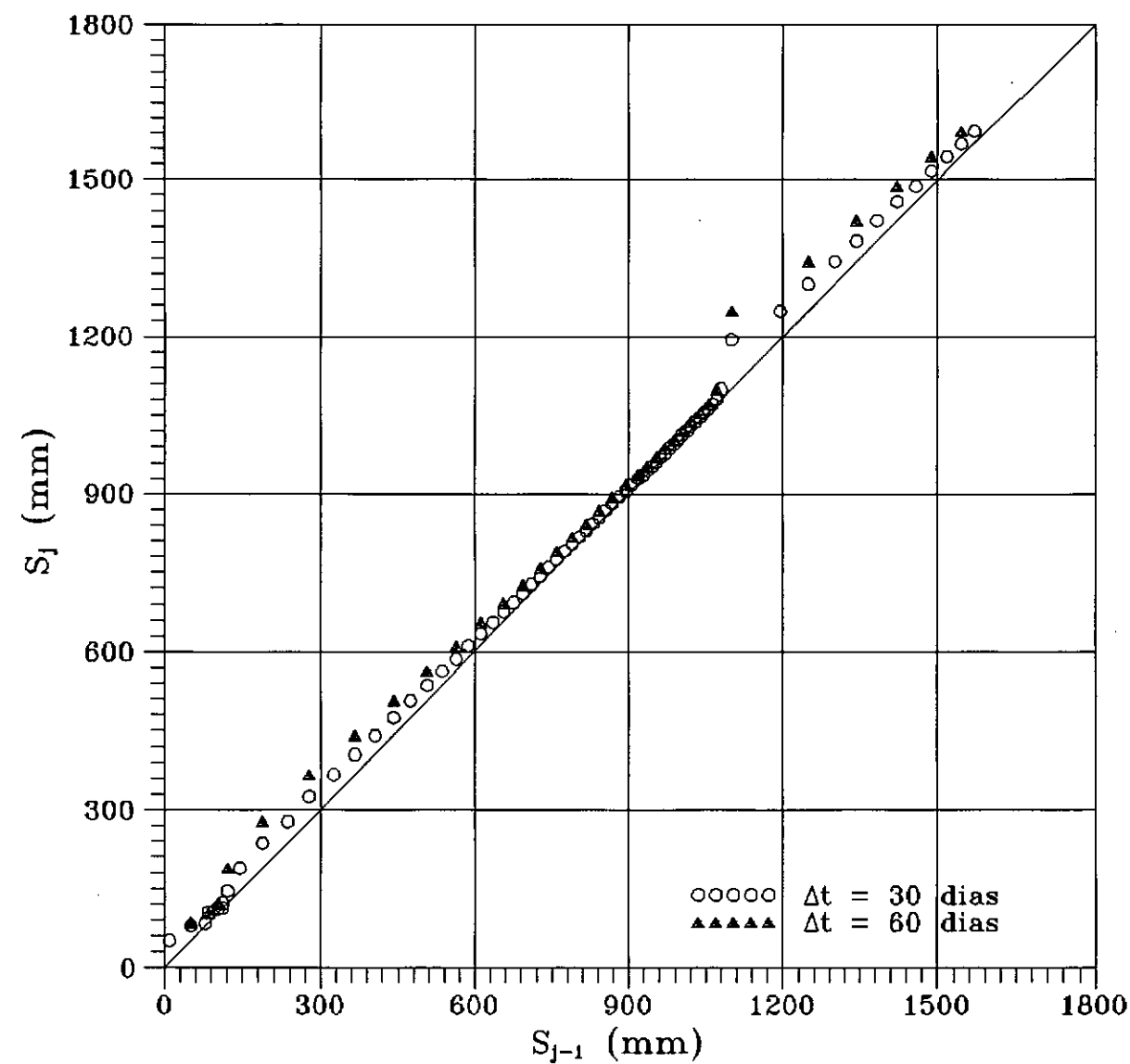


Fig. VI.51 - Construção de Asaoka - seção F - placa R14

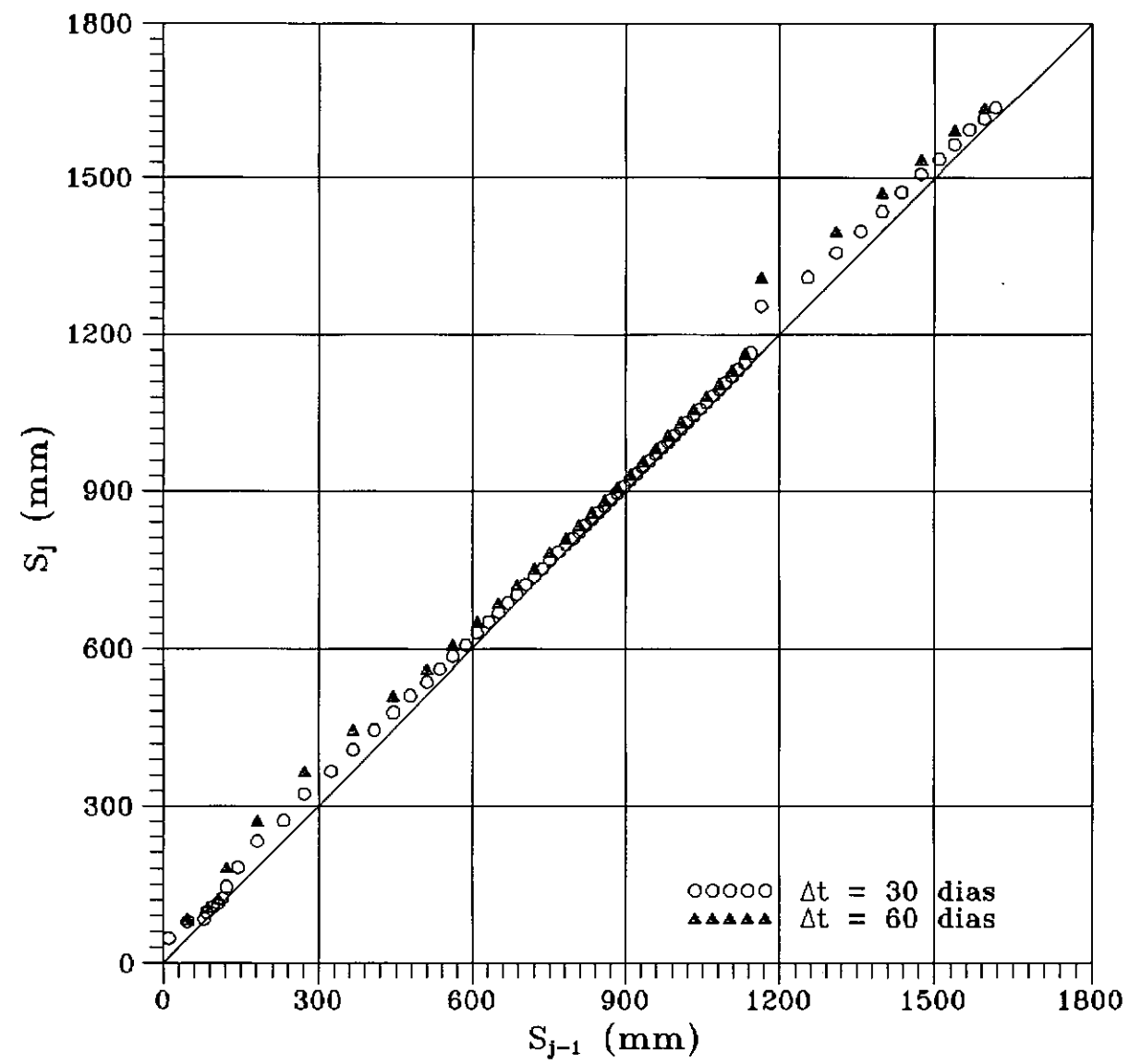


Fig. VI.52 - Construção de Asaoka - seção F - placa R15

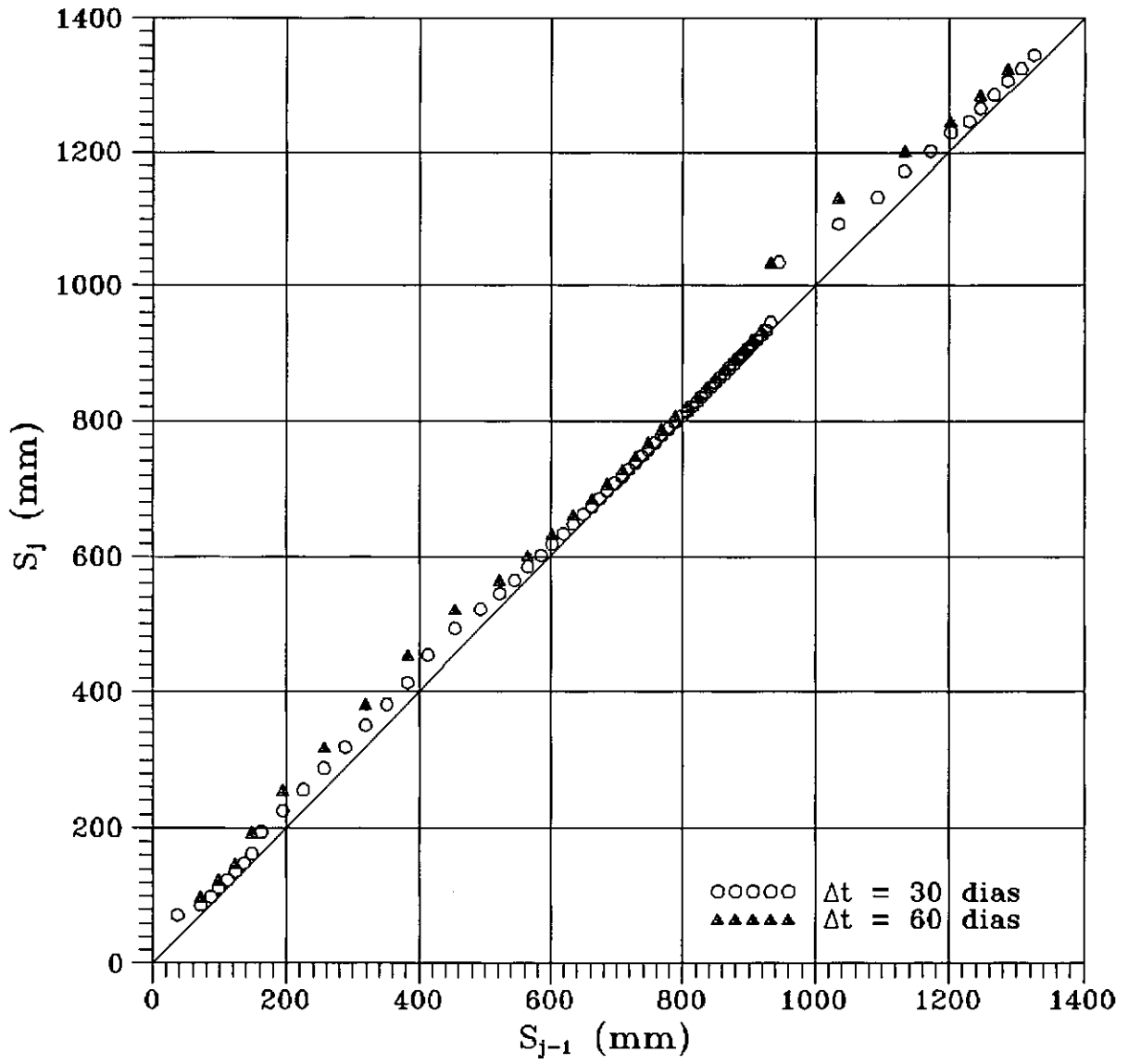


Fig. VI.53 - Construção de Asaoka - seção G - placa R2

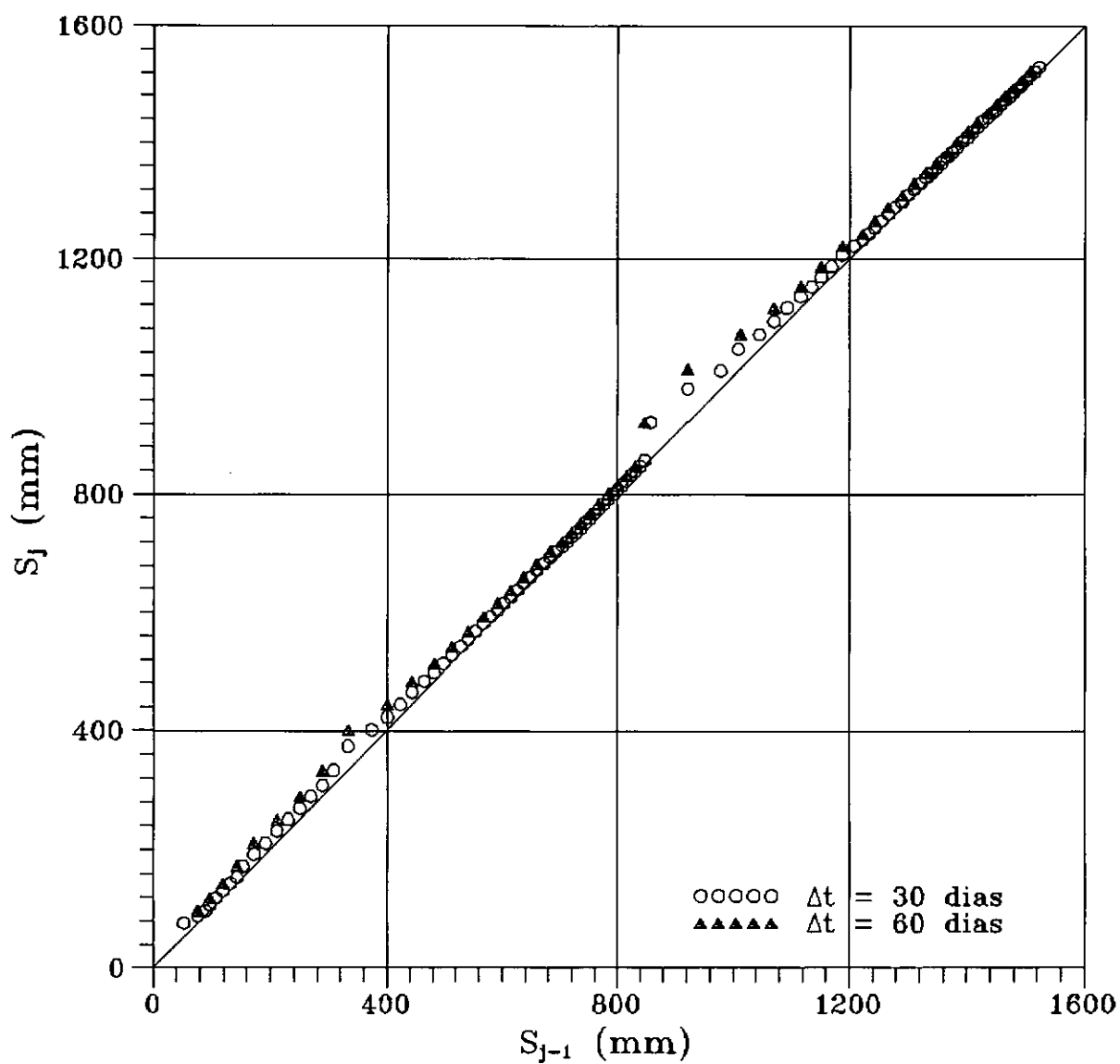


Fig. VI.54 - Construção de Asaoka - seção G - placa R3

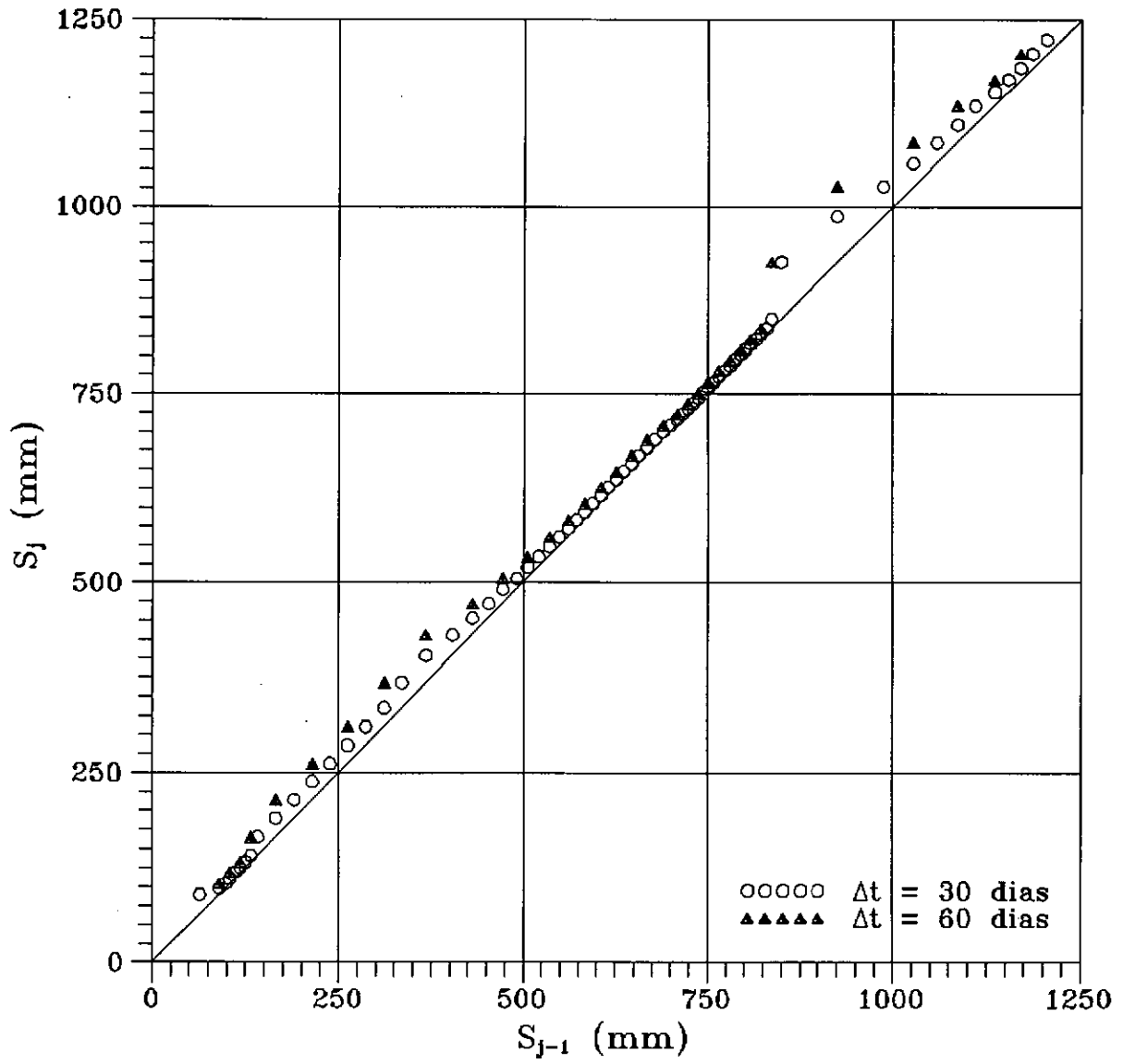


Fig. VI.55 - Construção de Asaoka - seção G - placa R4

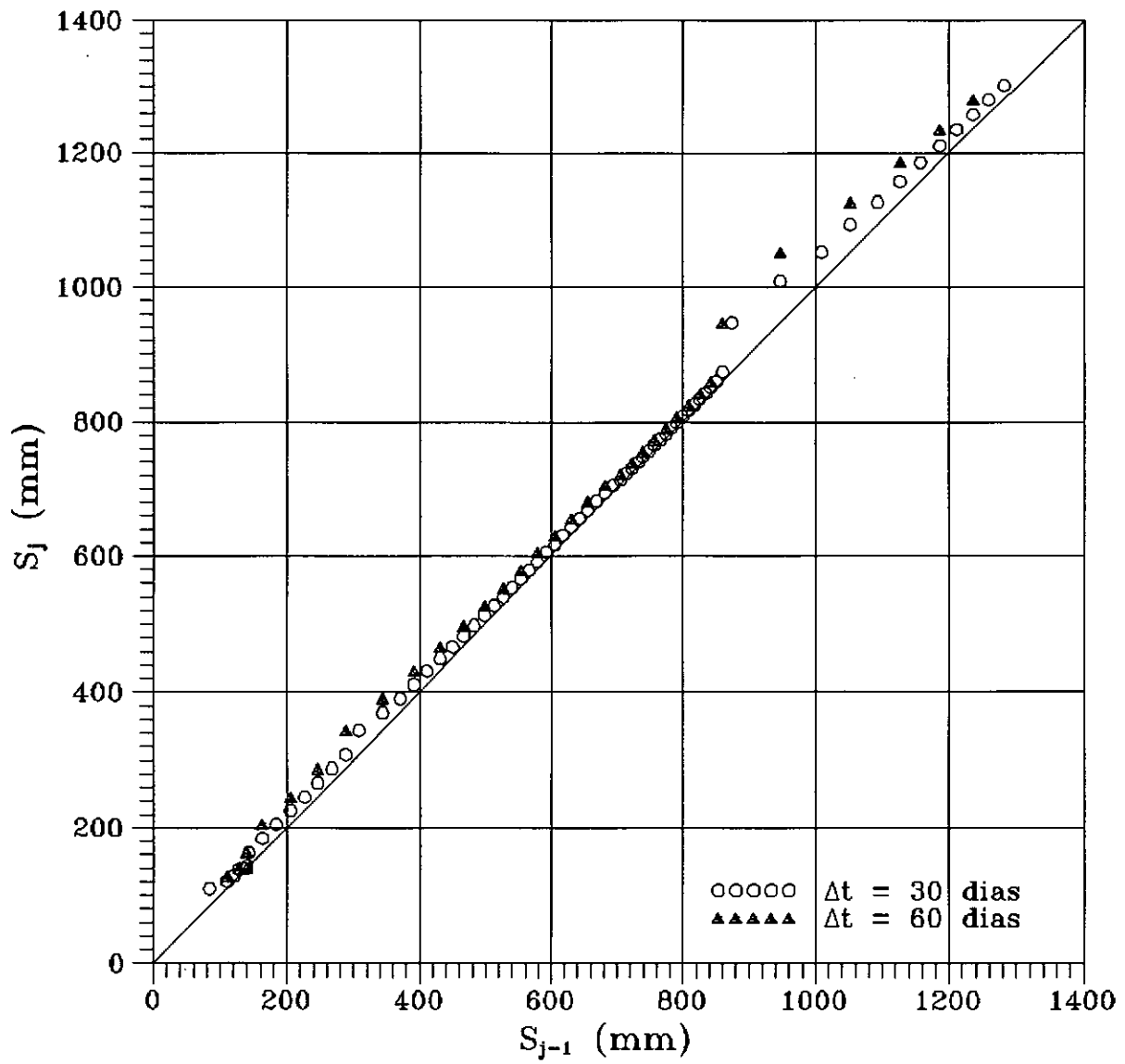


Fig. VI.56 - Construção de Asaoka - seção G - placa R11

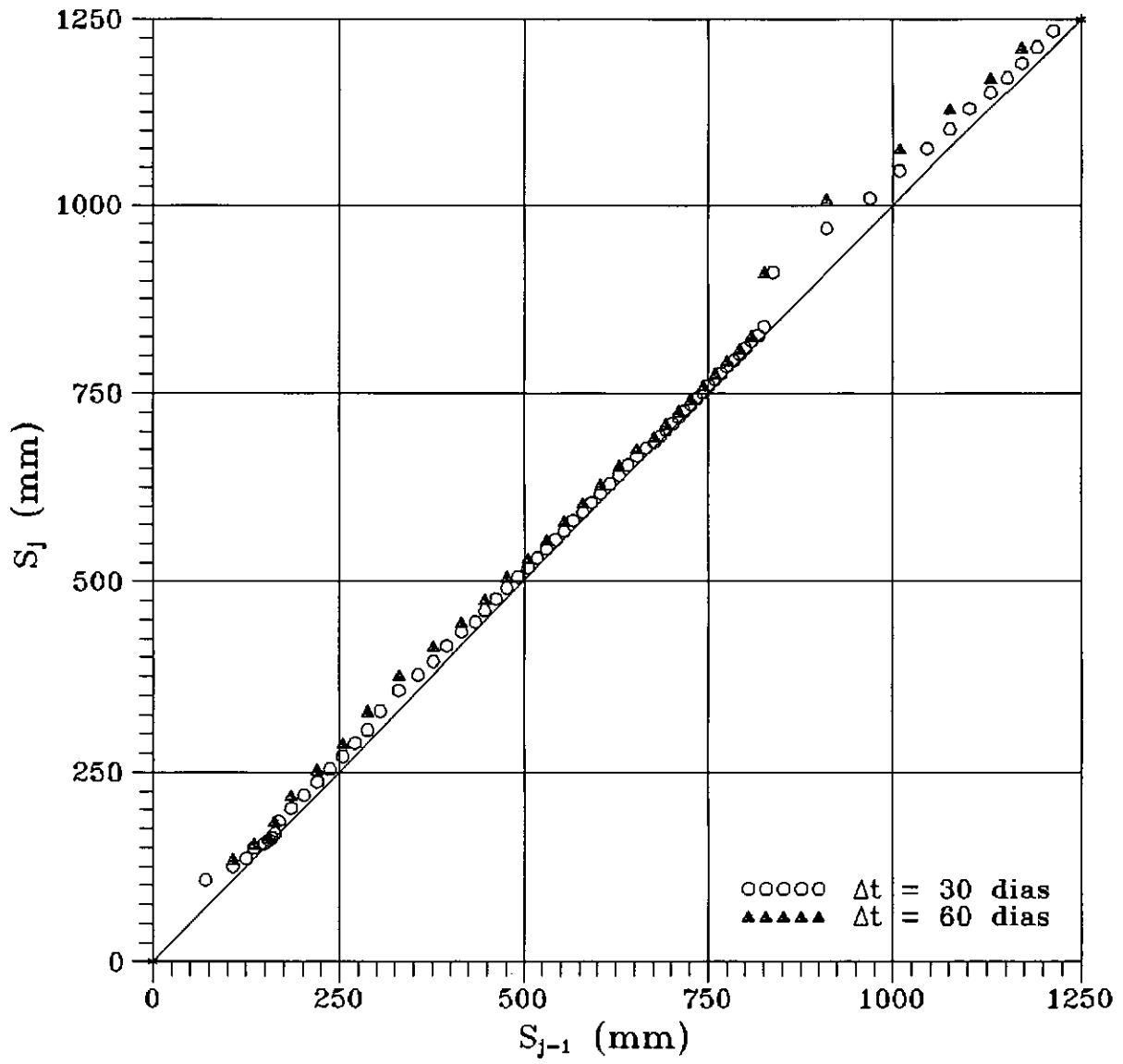


Fig. VI.57 - Construção de Asoka - seção G - placa R12



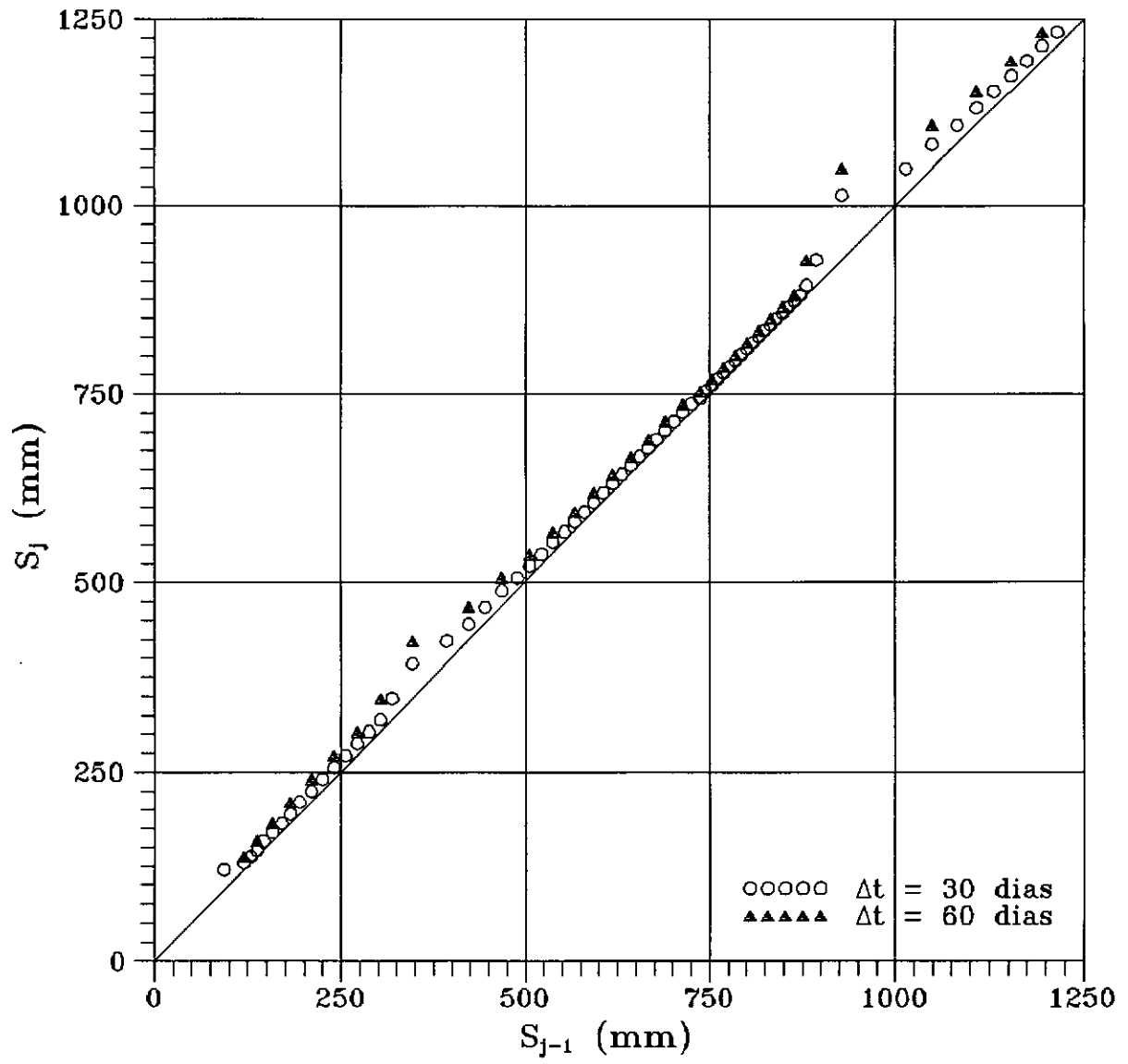


Fig. VI.58 - Construção de Asaoka - seção G - placa R13

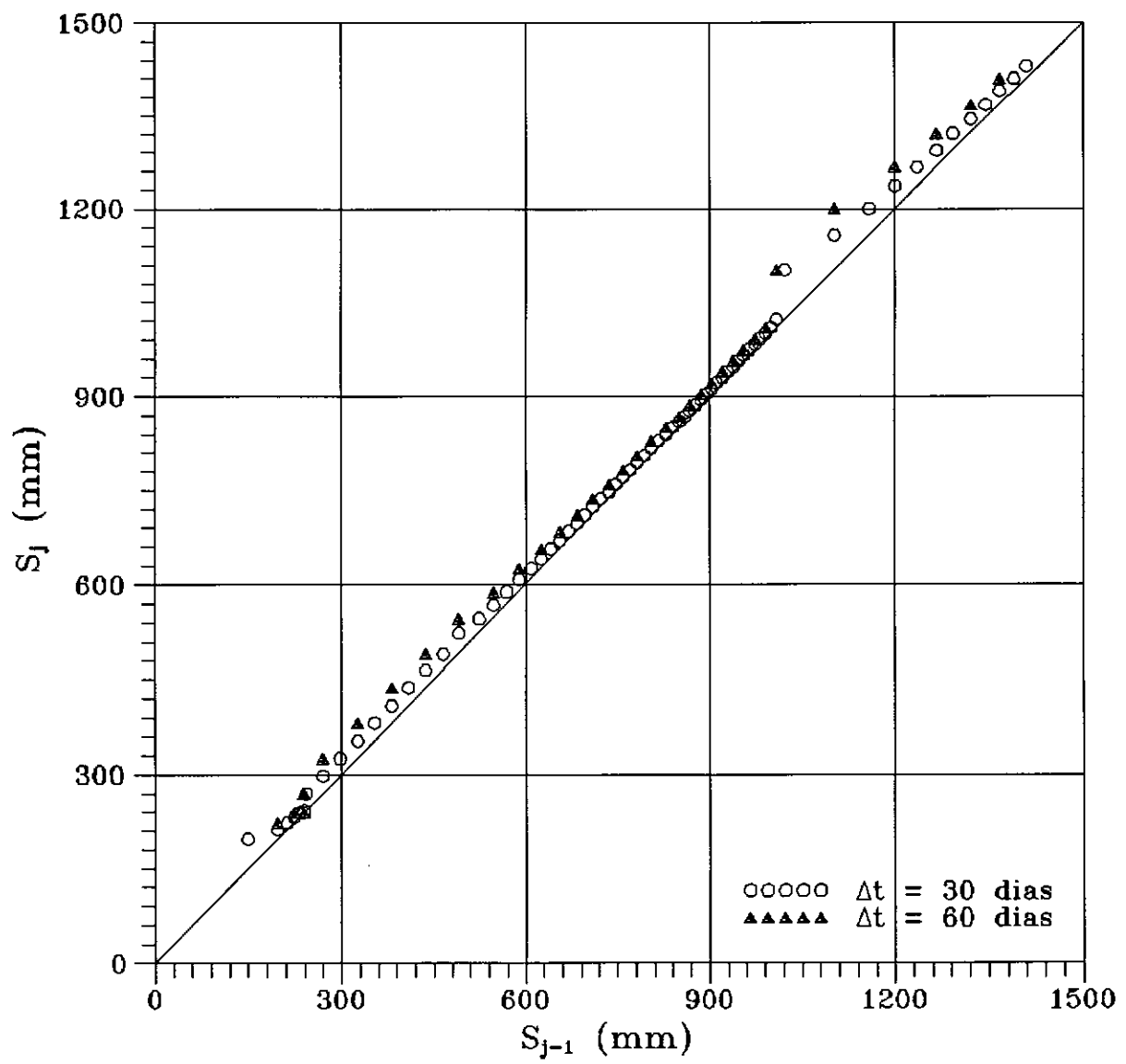


Fig. VI.59 - Construção de Asaoka - seção G - placa R14

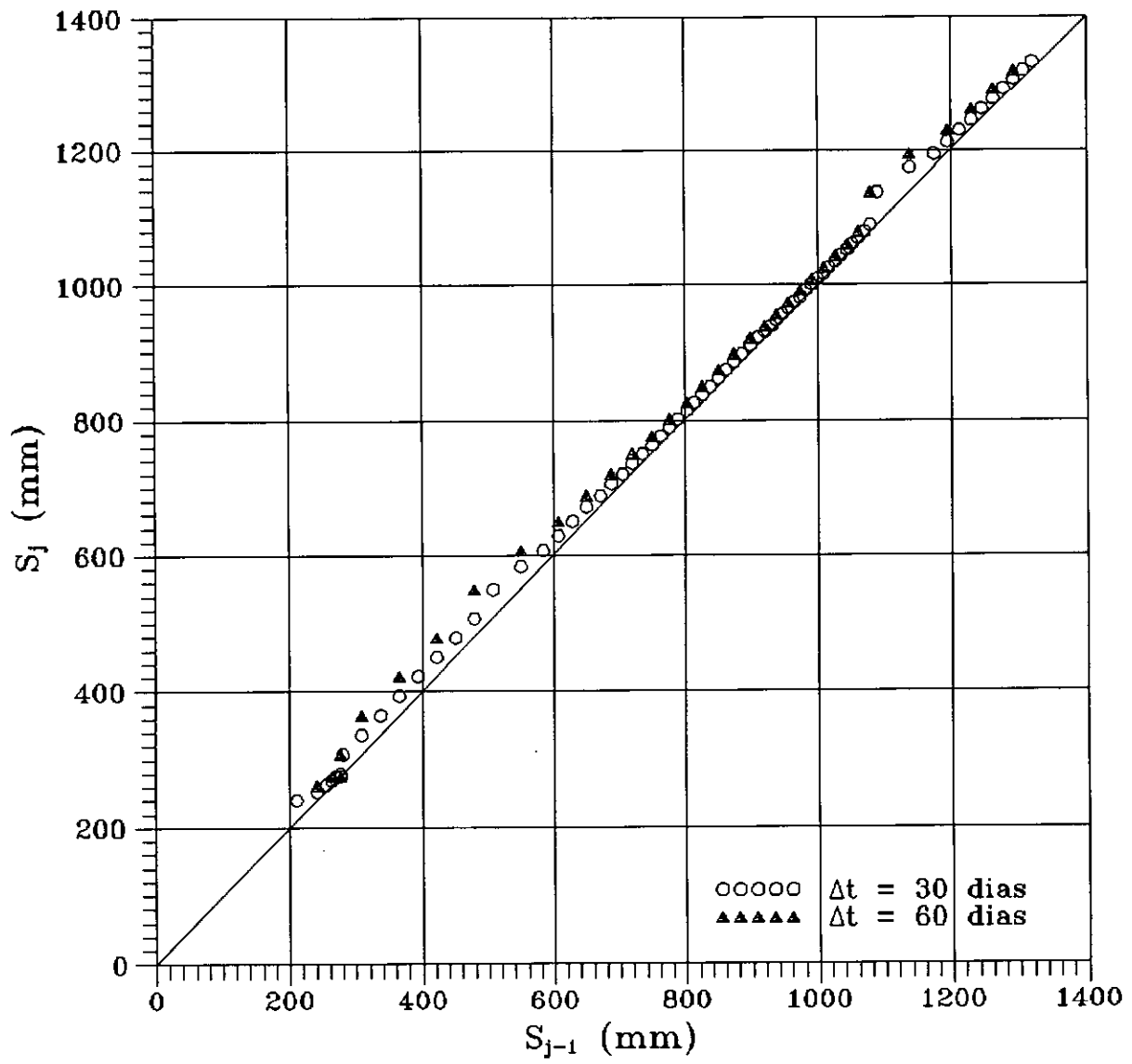


Fig. VI.60 - Construção de Asaoka - seção G - placa R15

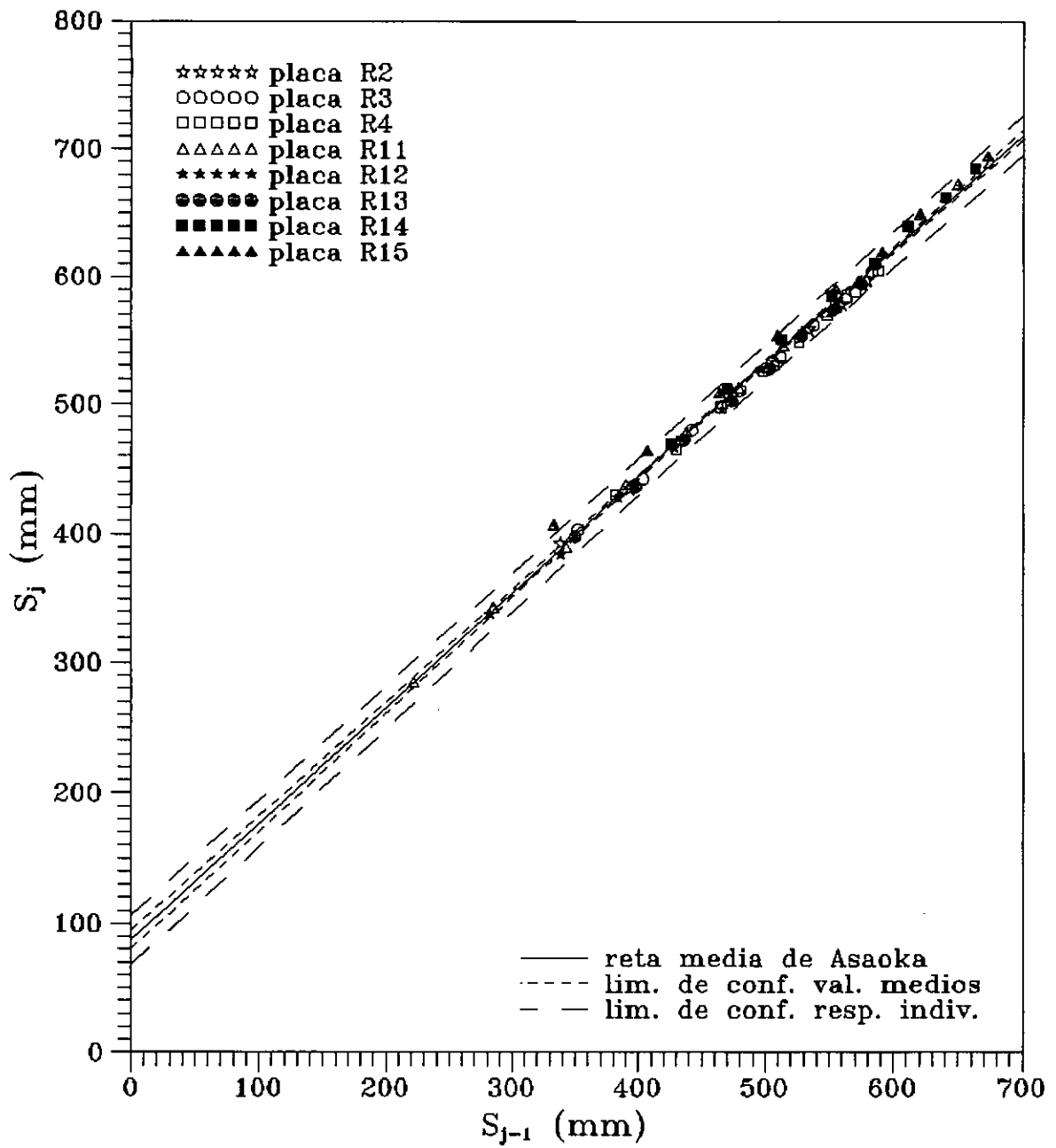


Fig. VI.61 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção A 2ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

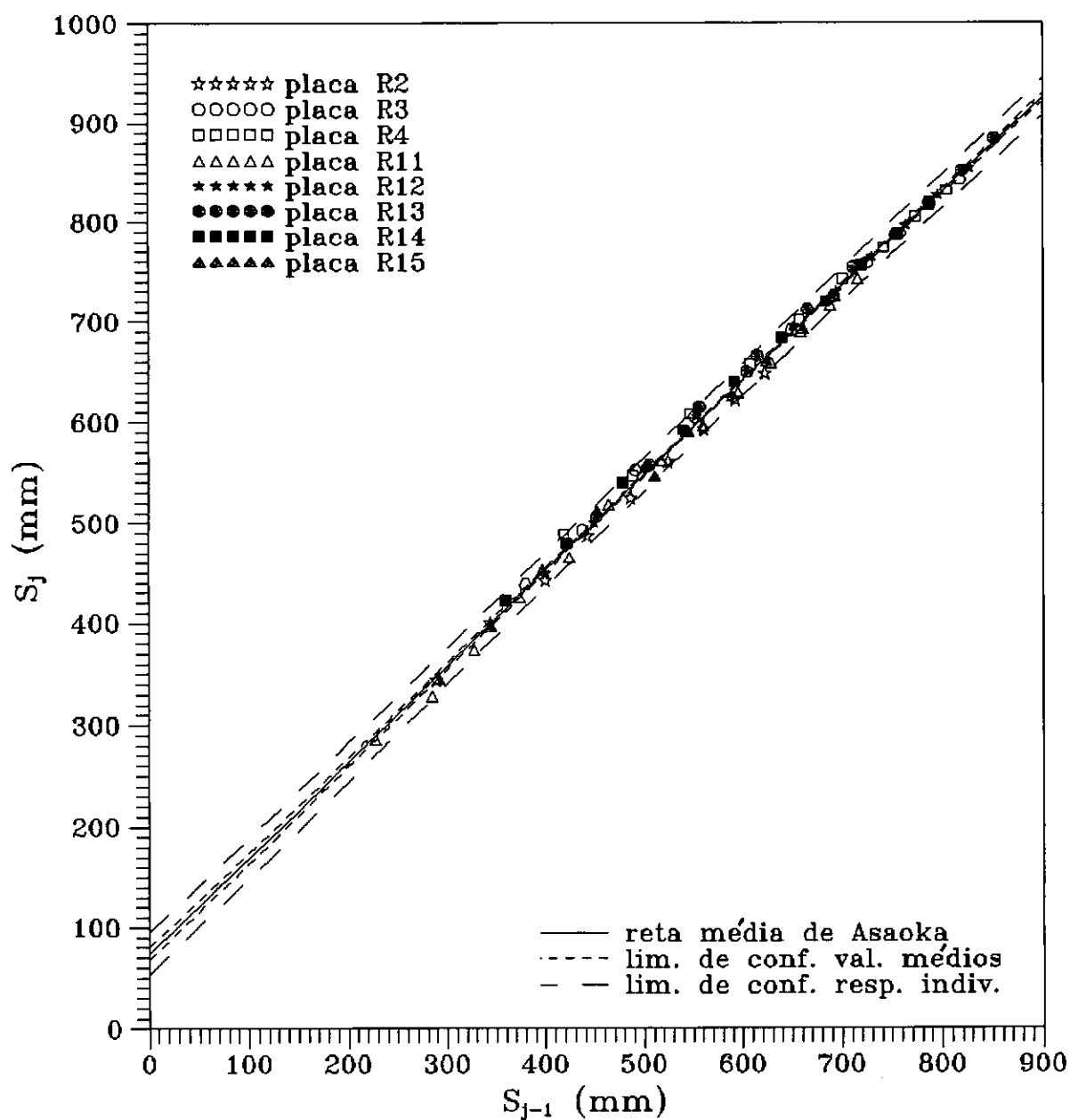


Fig. VI.62 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção B  
2ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

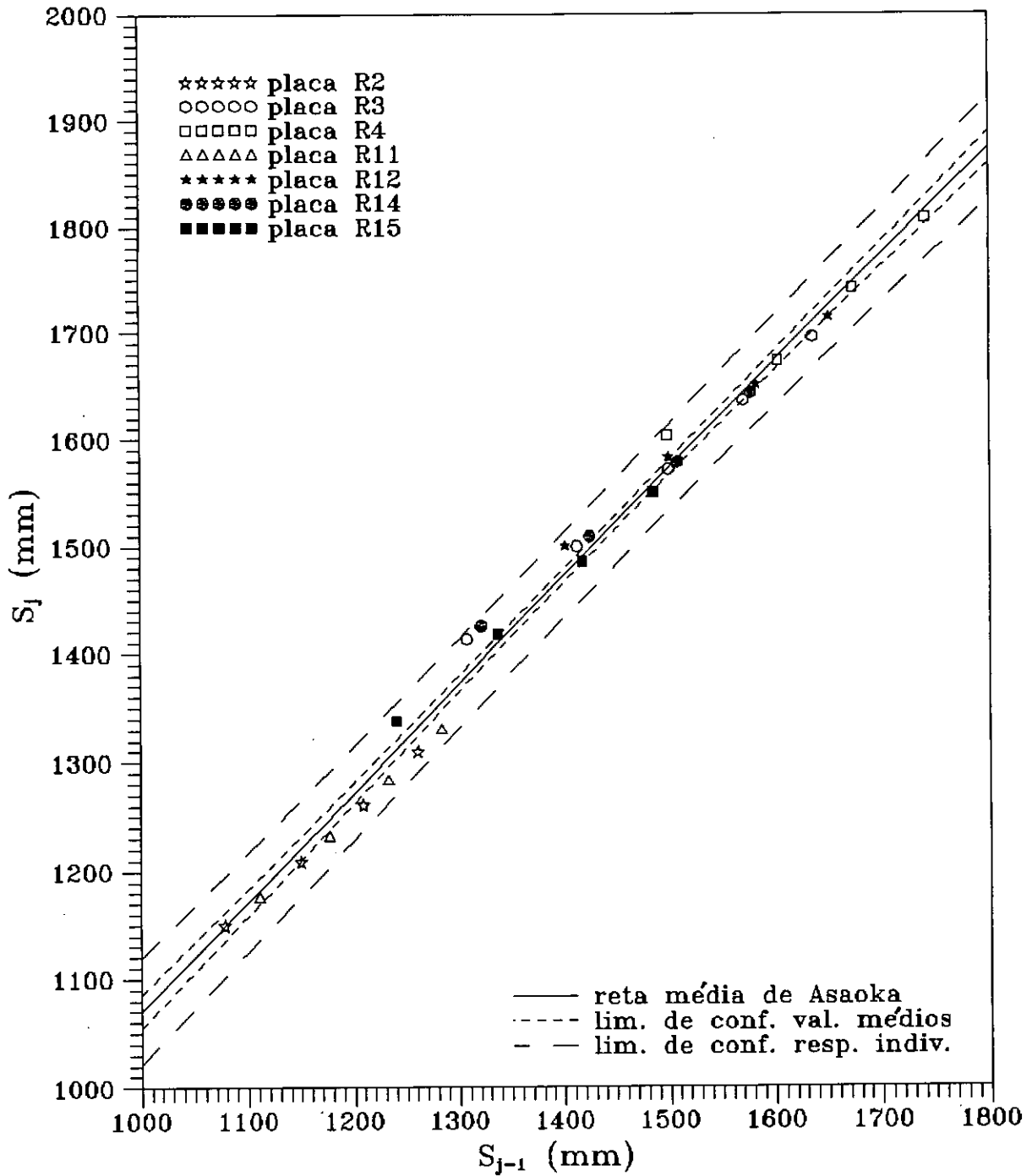


Fig. VI.63 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção B 3ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

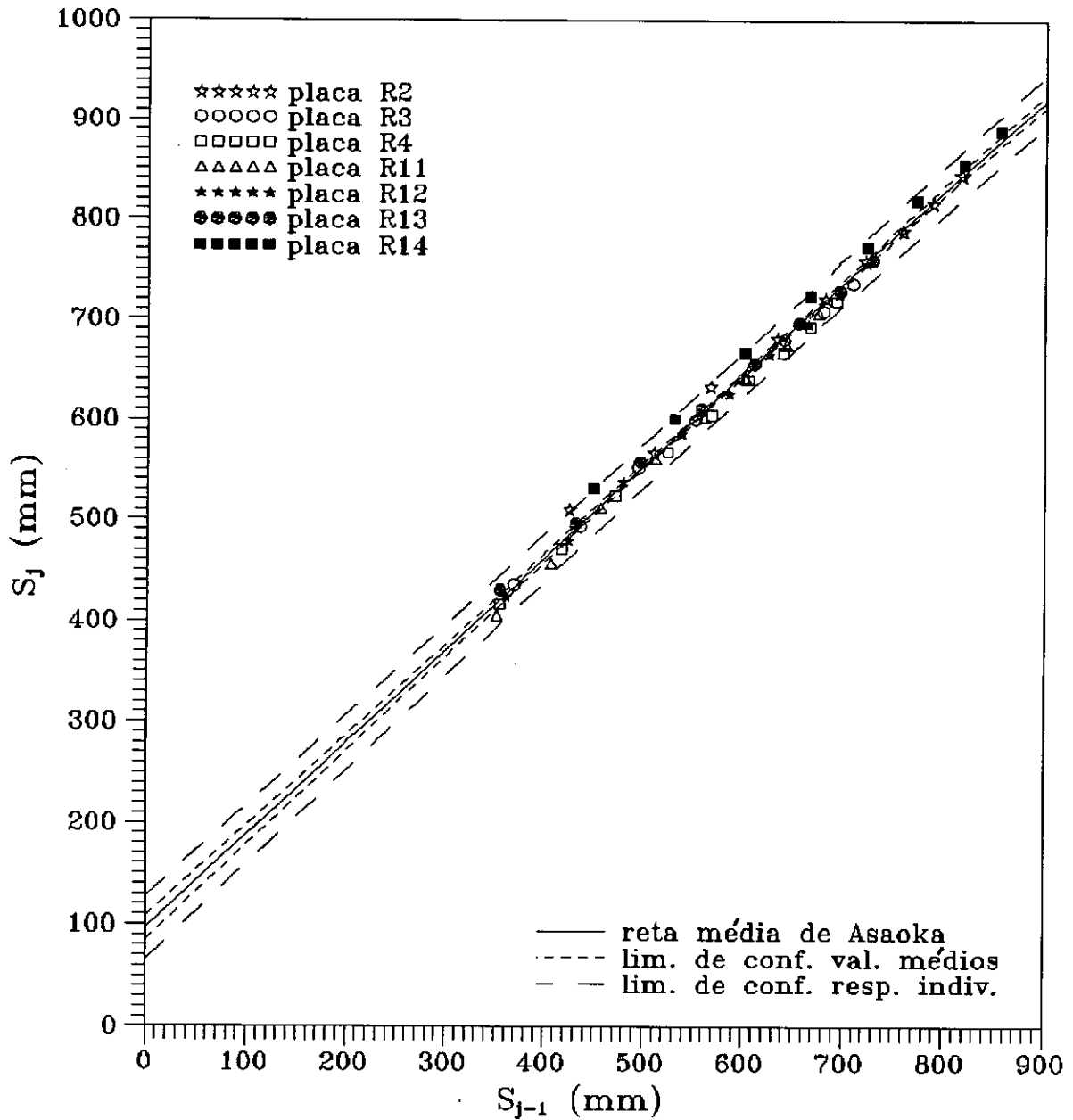


Fig. VI.64 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção C 2ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

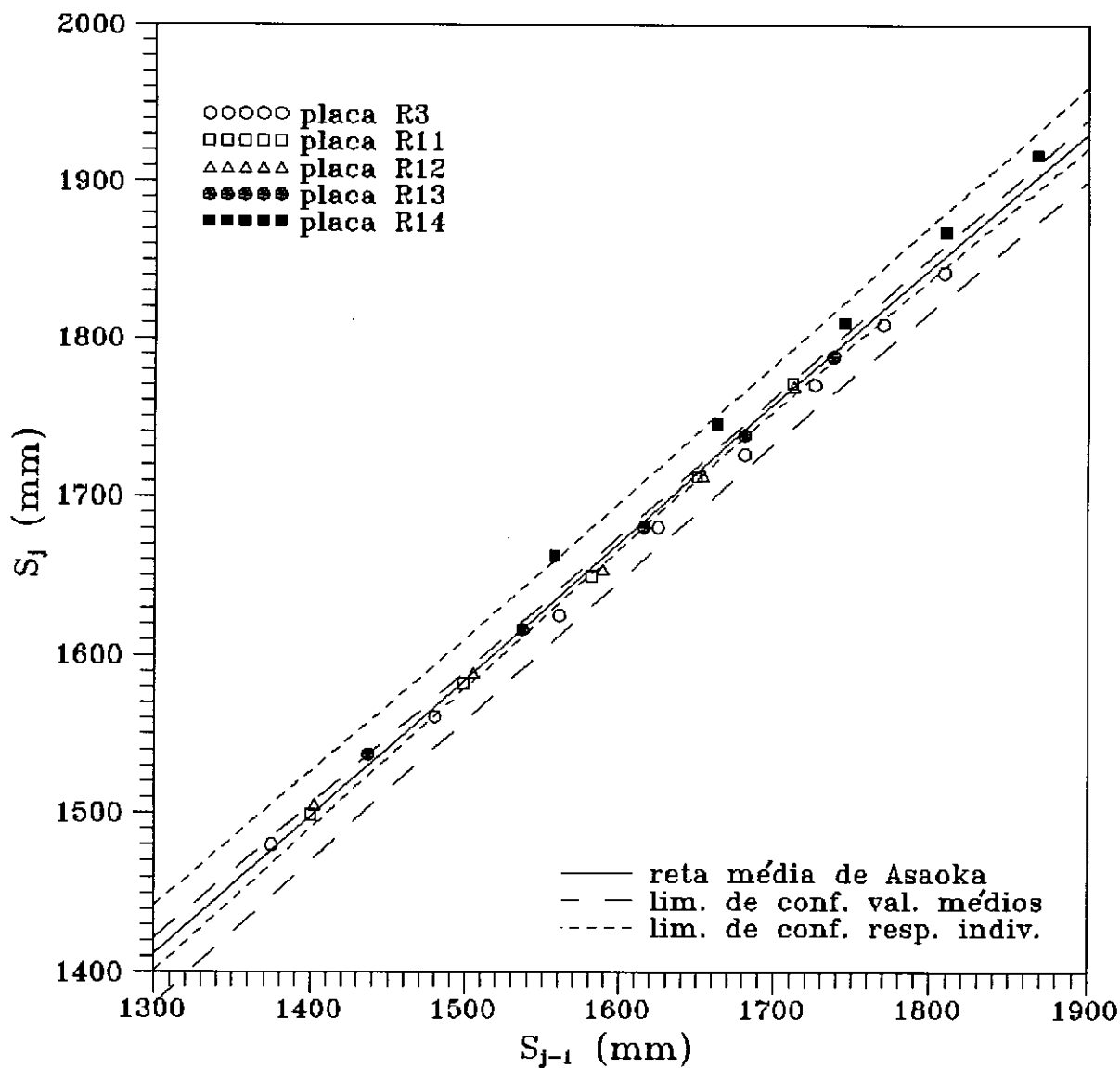


Fig. VI.65 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção C 3ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias



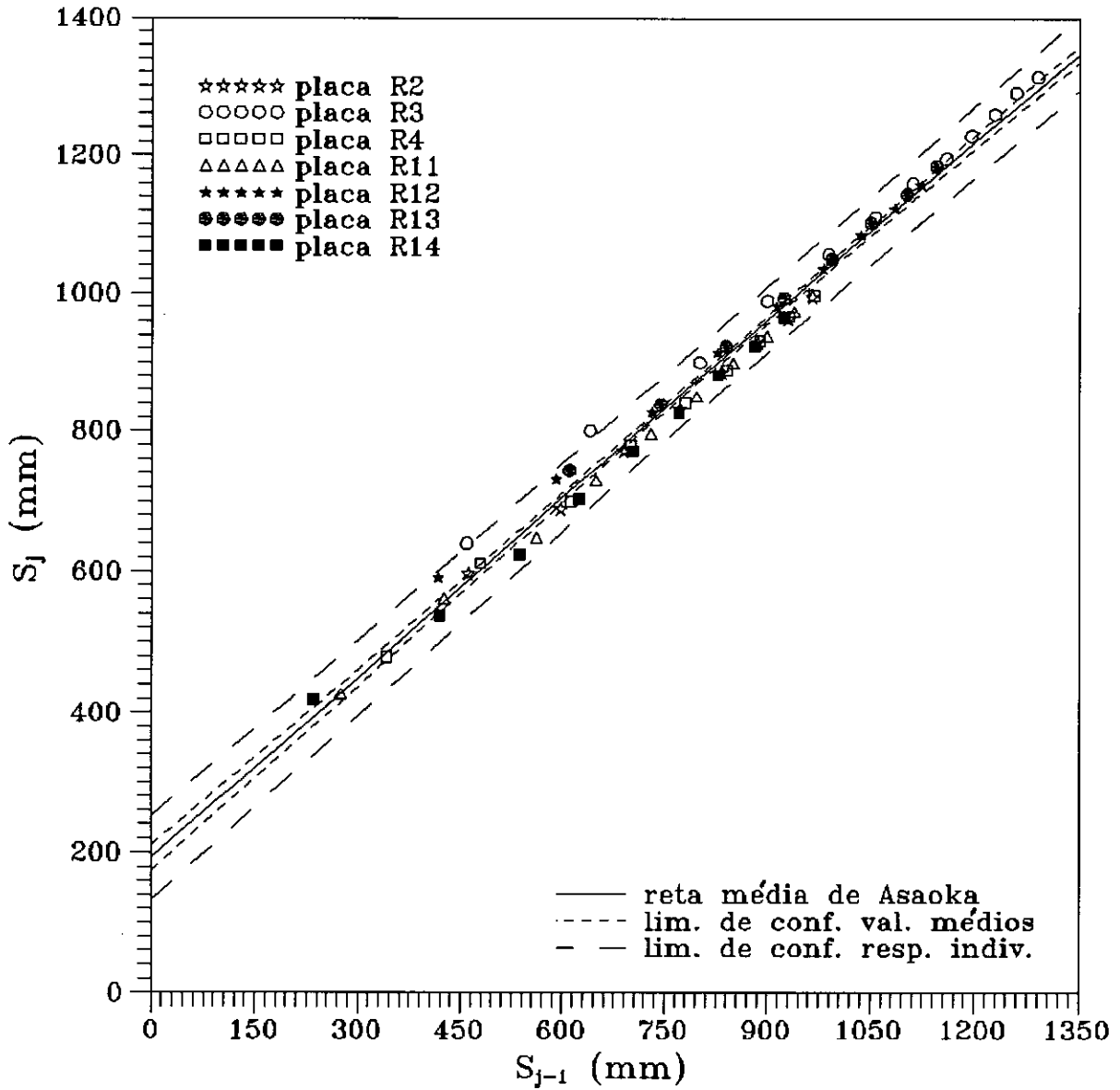


Fig. VI.66 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção D 2ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

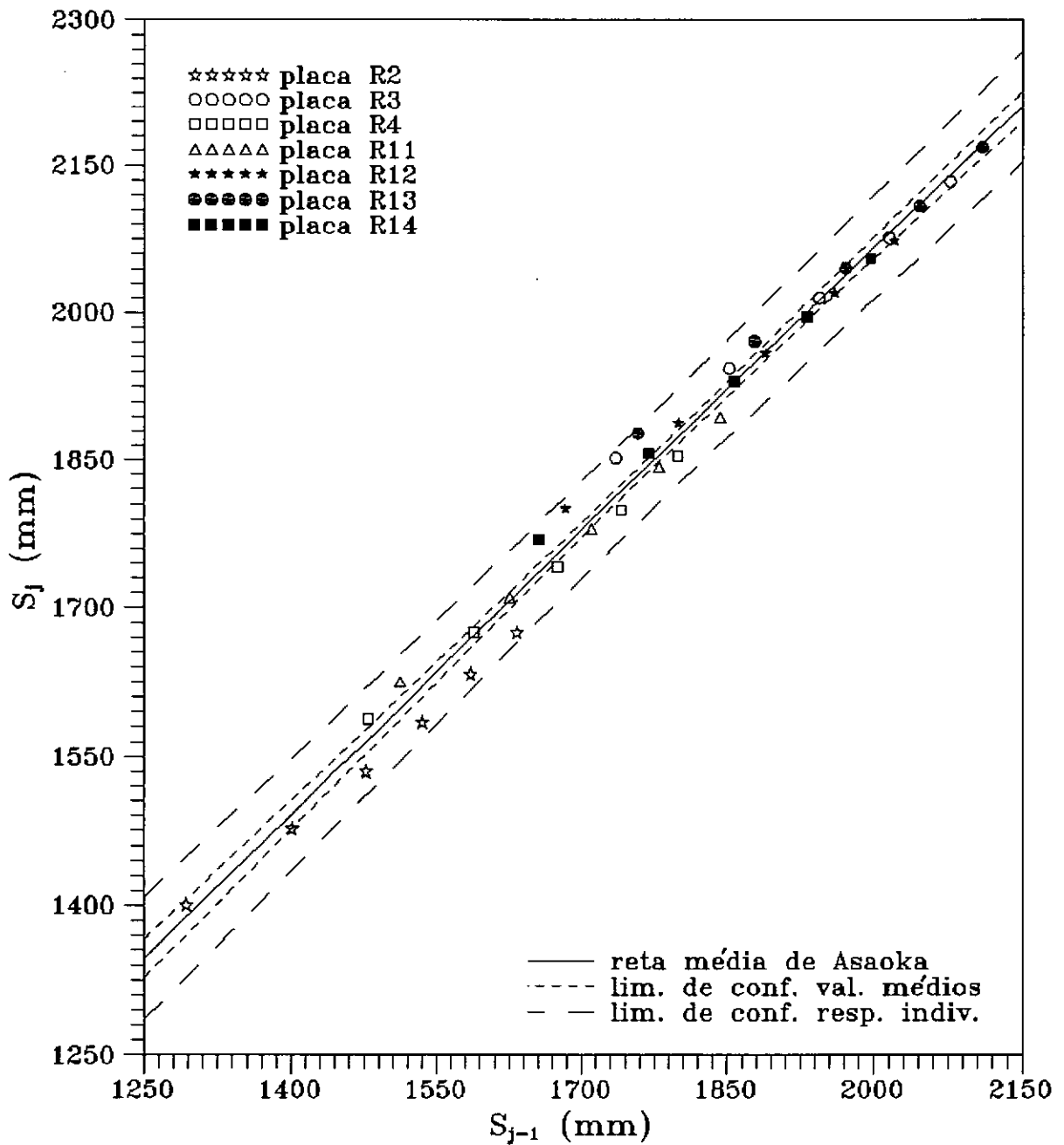


Fig. VI.67 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção D 3ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

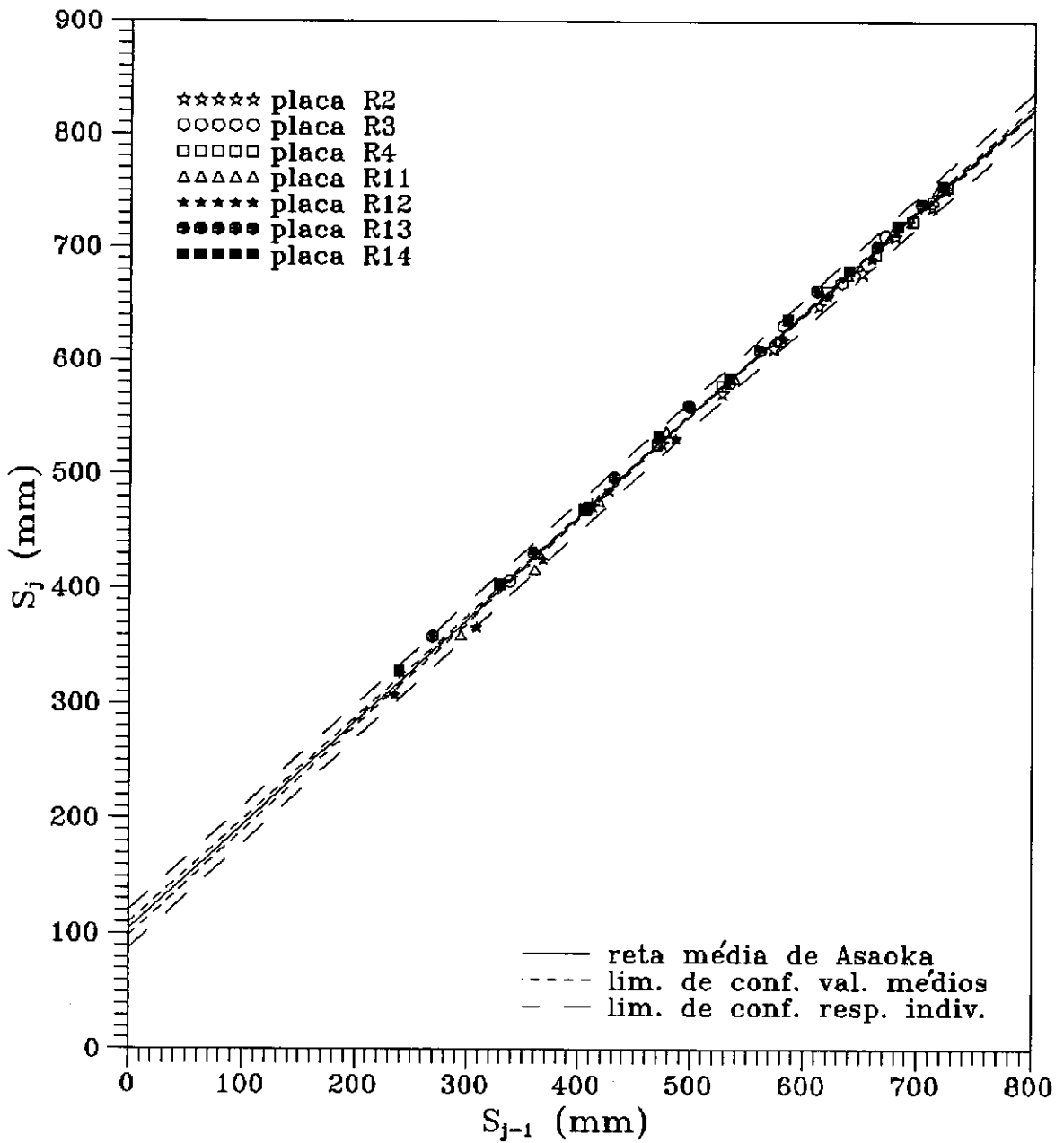


Fig. VI.68 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção E 2ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

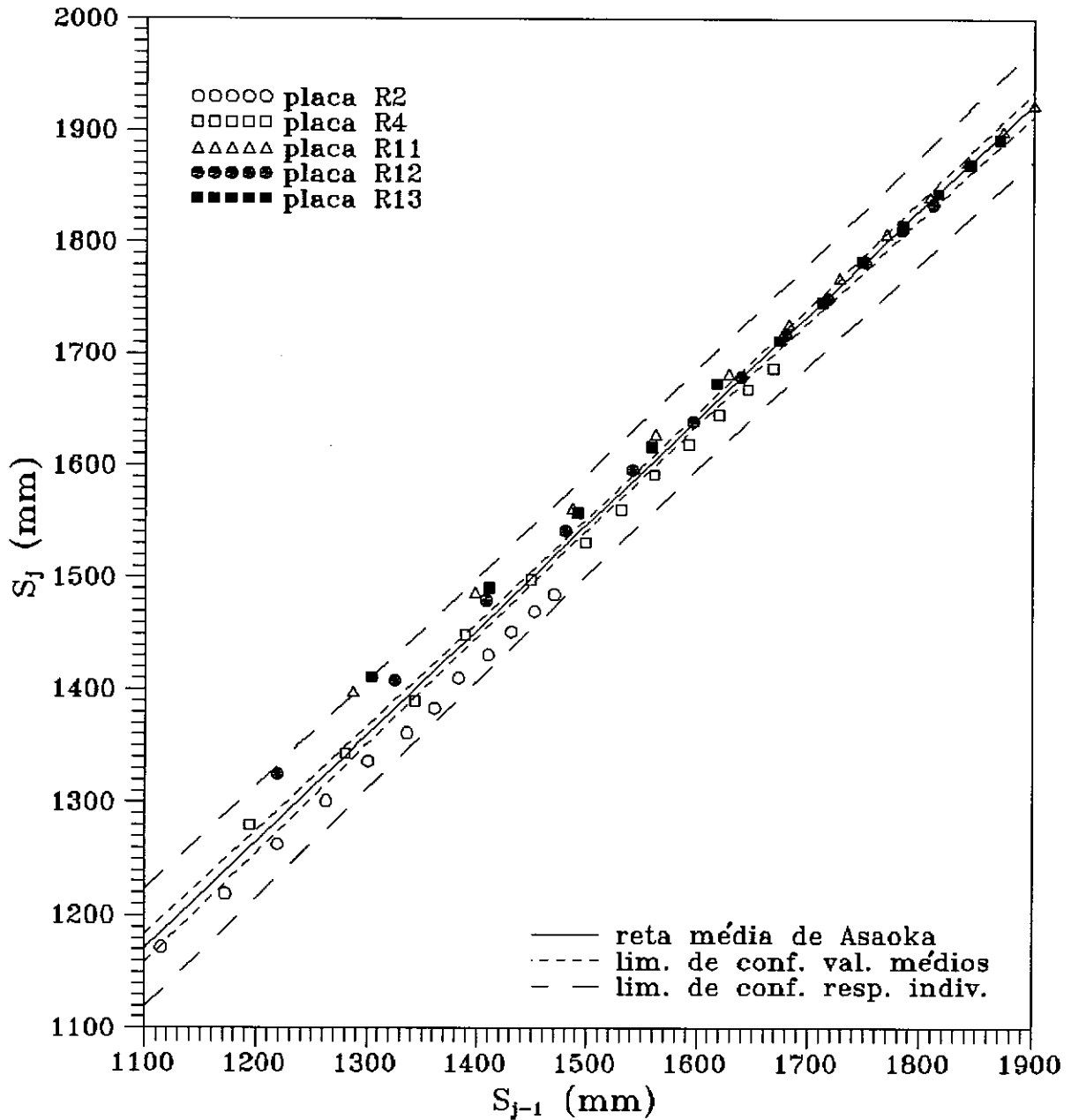


Fig. VI.69 – Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção E 3ª etapa –  $\Delta t = 60$  dias

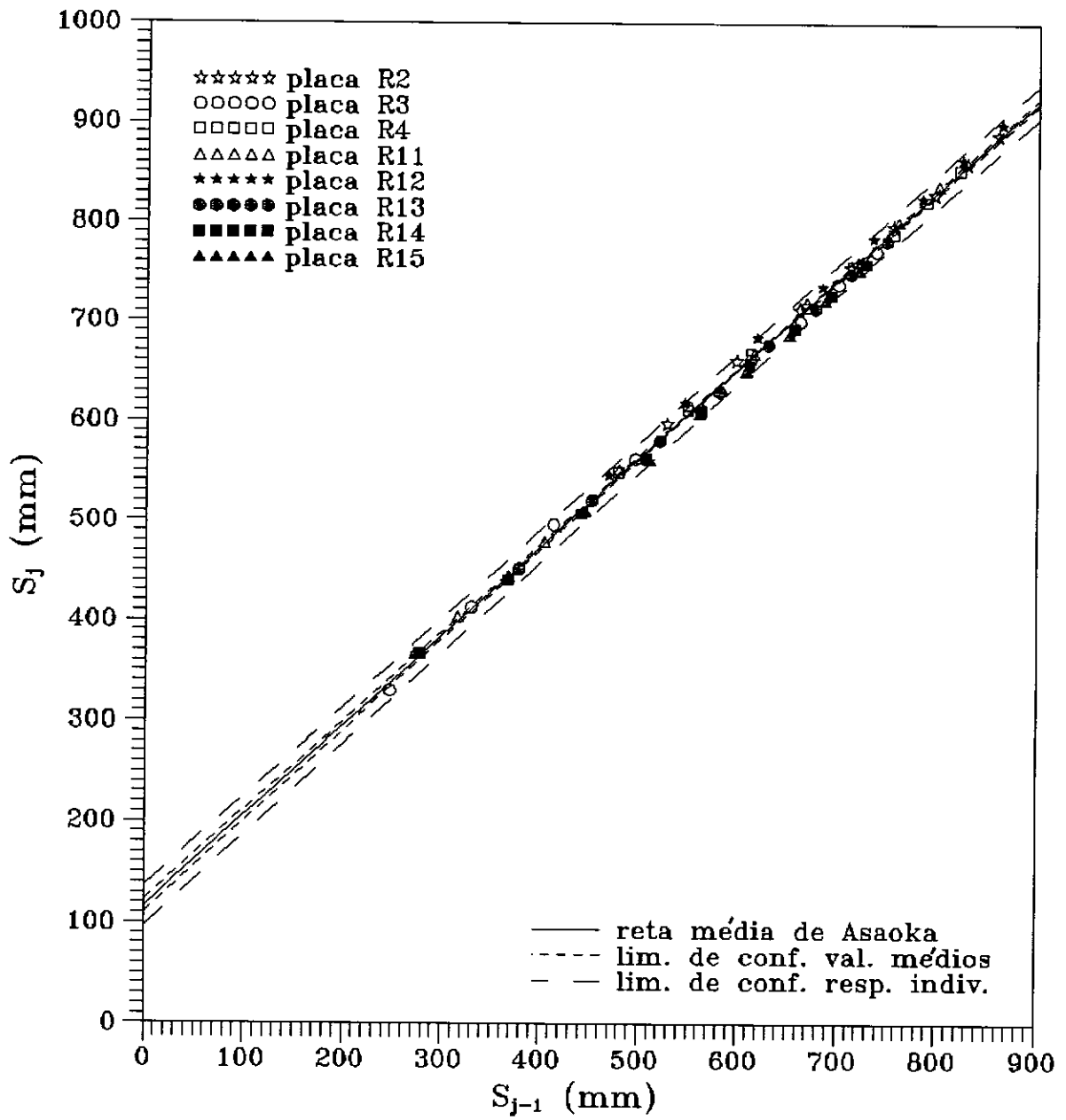


Fig. VI.70 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção F 2ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

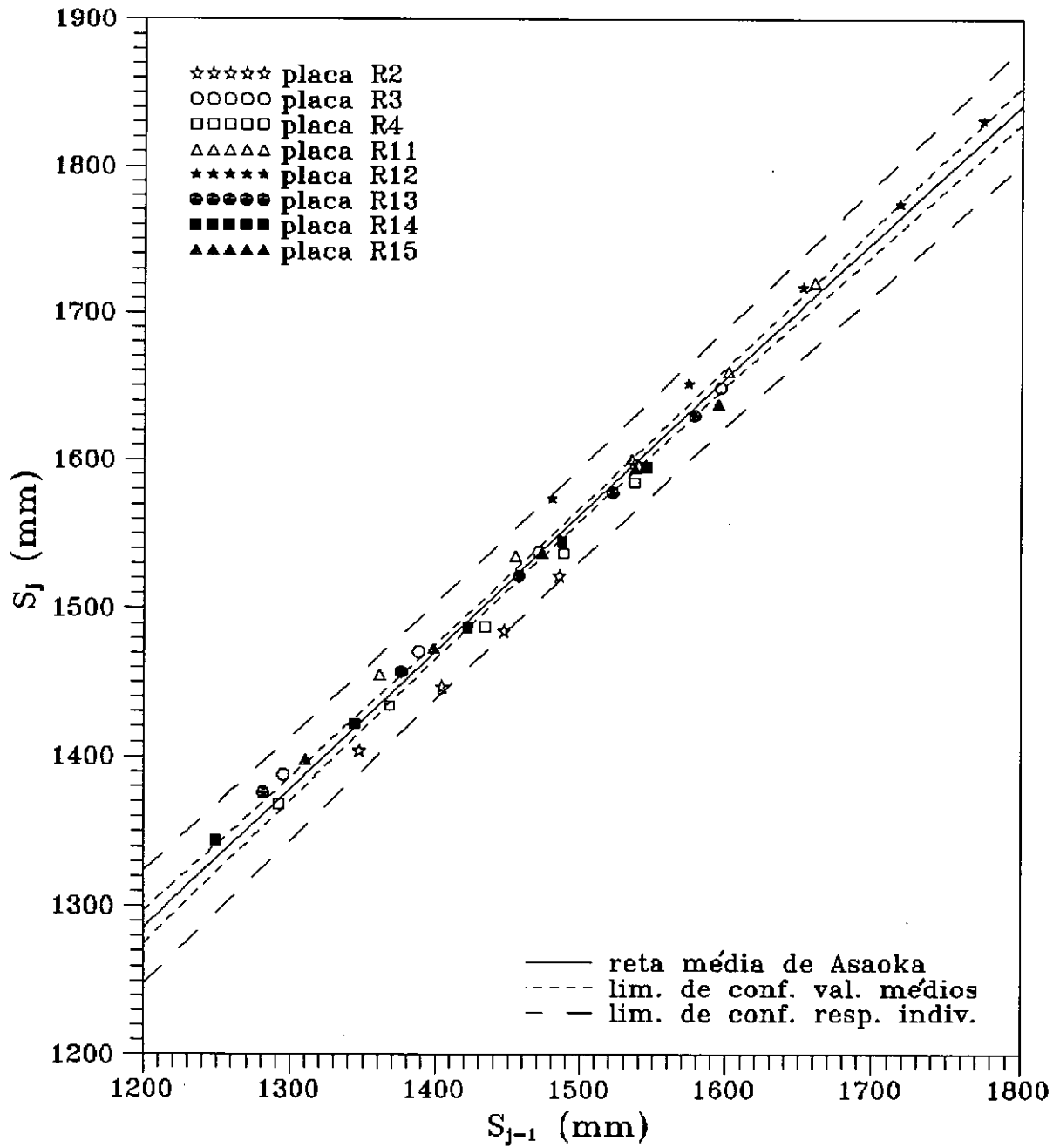


Fig. VI.71 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção F 3ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

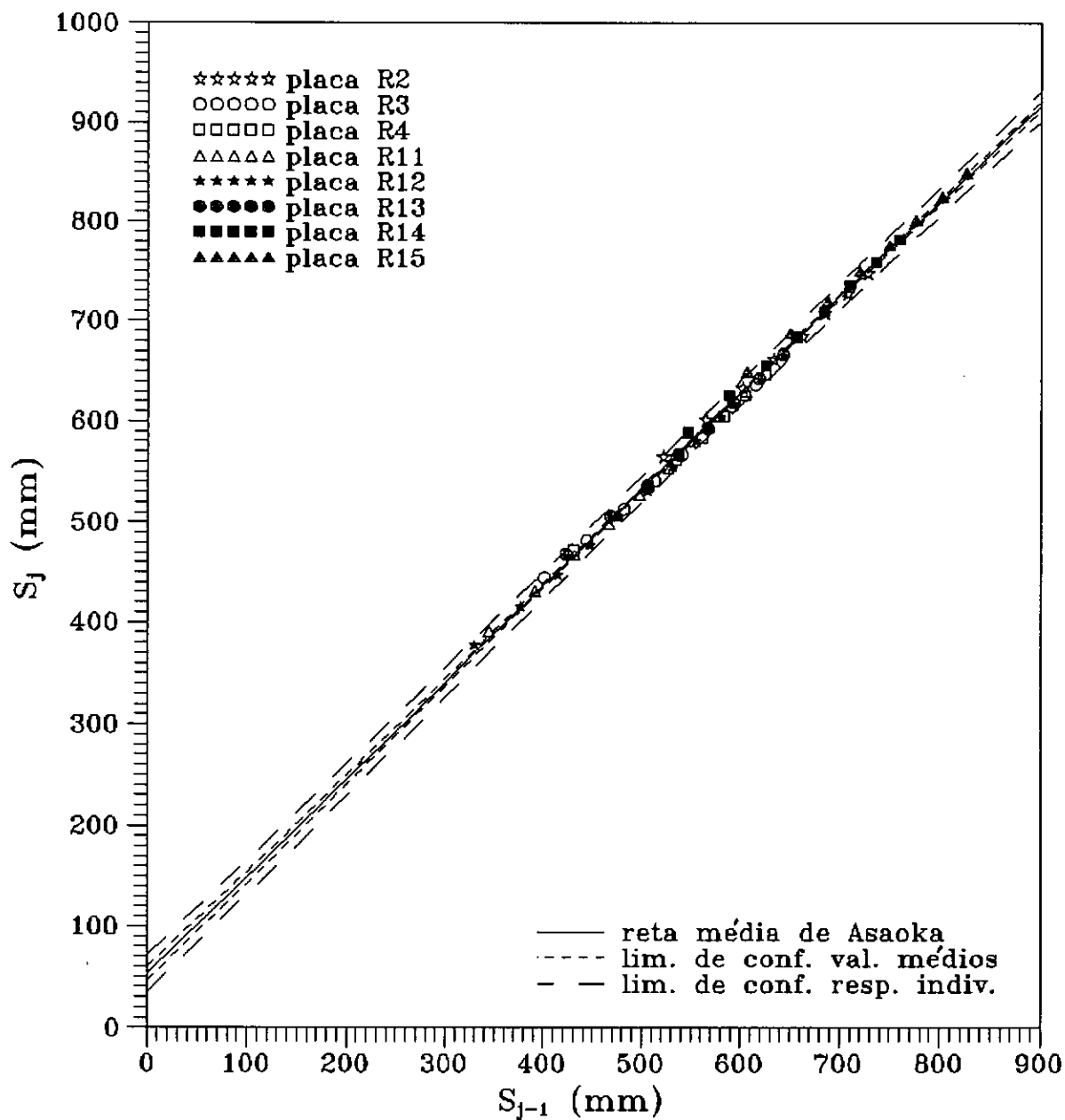


Fig. VI.72 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção G 2ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias

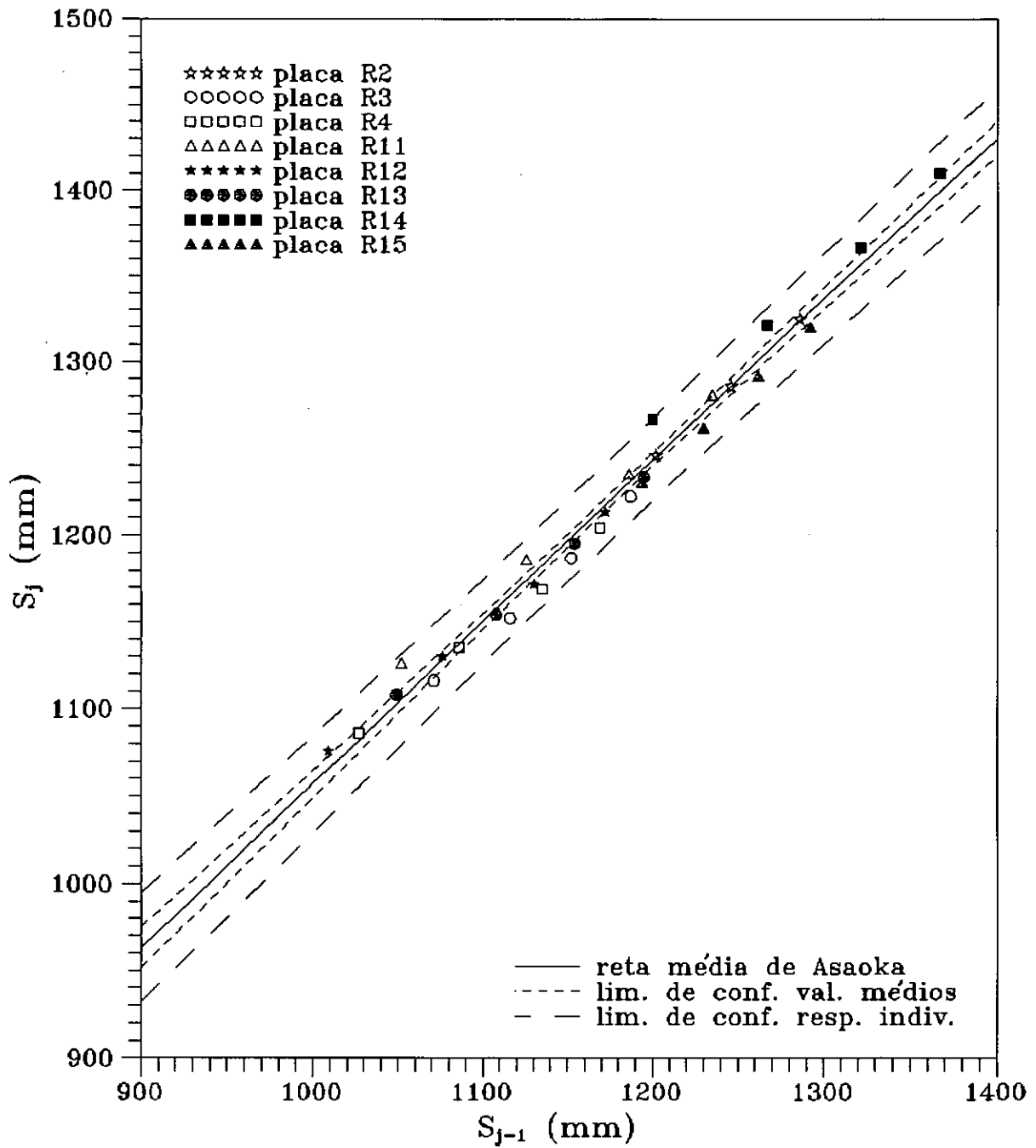


Fig. VI.73 - Intervalos de confiança dos valores médios e da resposta individual para a reta de Asaoka, a partir da análise por regressão linear do conjunto de placas da seção G 3ª etapa -  $\Delta t = 60$  dias



## CAPÍTULO VII

### Discussão dos Resultados

#### VII.1 Análise dos Recalques

##### VII.1.1 Comparação entre Curvas de Recalque Medidas e Calculadas

As figuras (VII.1) a (VII.6) apresentam uma comparação entre as curvas de recalques medidos e as curvas calculadas a partir dos resultados obtidos pela análise através do Método de Asaoka para  $\Delta t=30$  dias, apenas para a terceira etapa de carregamento em separado.

Tendo em vista que não foi feita a análise pelo Método de Asaoka Modificado para a primeira etapa, não foi feita esta comparação para a segunda etapa, já que não é possível descontar do valor do recalque total para esta, o valor do recalque final estimado para a primeira etapa para as curvas calculadas.

As curvas medidas foram deslocadas para a origem dos eixos, descontando-se para cada placa, os recalques medidos até a data de aplicação da terceira etapa de carregamento.

Para as curvas calculadas foi utilizada a formulação proposta no item III.6 (equação (III.36)) deste trabalho, fazendo-se as devidas adaptações, visto se tratar de um caso de carregamento aplicado em mais de uma etapa. As curvas

calculadas não se iniciam na origem dos eixos devido à utilização da expressão simplificada da equação de Terzaghi para adensamento unidimensional (equação (III.23)).

Assim:

$$S(t) = \left( \frac{\beta_{03}}{1-\beta_{13}} - \frac{\beta_{02}}{1-\beta_{12}} \right) \cdot \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp \left( -\frac{\ln(\beta_{13})}{\Delta t} \cdot t \right) \right] \quad (\text{VII.1})$$

onde:

$S(t)$  é o recalque calculado em um tempo  $t$ , contado a partir do início da aplicação do carregamento da 3ª etapa;

$\beta_{03}$  é o coeficiente linear da reta de Asaoka para a 3ª etapa;

$\beta_{13}$  é o coeficiente angular da reta de Asaoka para a 3ª etapa;

$\beta_{02}$  é o coeficiente linear da reta de Asaoka para a 2ª etapa;

$\beta_{12}$  é o coeficiente angular da reta de Asaoka para a 2ª etapa;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo adotado na análise;

$t$  é o tempo contado a partir do início da 3ª etapa.

Utilizando-se na equação (VII.1) os valores médios de  $\beta_{03}$ ,  $\beta_{13}$ ,  $\beta_{02}$  e  $\beta_{12}$ , obtém-se a curva média de recalques com o tempo (Método de Expansão em Série de Taylor).

Para a definição dos intervalos de confiança, utilizando-se o Método de Expansão em Série de Taylor, obtém-se a variância e conseqüentemente o desvio padrão de  $S(t)$ , através da seguinte equação:

$$\begin{aligned}
 (\sigma_{S(t)})^2 = & \frac{\partial S(t)}{\partial \beta_{13}} \cdot (\sigma_{\beta_{13}})^2 + \frac{\partial S(t)}{\partial \beta_{03}} \cdot (\sigma_{\beta_{03}})^2 + \\
 & + \frac{\partial S(t)}{\partial \beta_{02}} \cdot (\sigma_{\beta_{02}})^2 + \frac{\partial S(t)}{\partial \beta_{12}} \cdot (\sigma_{\beta_{12}})^2
 \end{aligned} \tag{VII.2}$$

Para a seção E (drenos fibroquímicos), única para a qual foi possível obter para todas as placas as medidas de recalque até cerca de 1500 dias após a aplicação da terceira etapa de carregamento, observa-se que as curvas medidas estão todas situadas dentro do intervalo de confiança da média. Para esta seção a curva média calculada apresenta uma boa concordância (a menos do trecho inicial) em relação ao conjunto de curvas medidas, observando-se porém que a estabilização dos recalques para a curva calculada ocorre a um tempo e para um valor de recalque inferior àqueles das curvas medidas.

O mesmo se dá para as seções B (drenos de areia tipo ponta fechada), C (drenos de areia tipo ponta aberta) e G (sem drenos verticais).

As diferenças observadas se devem aos recalques por adensamento secundário que levam a que esta estabilização se dê a valores de tempo mais elevados que aqueles obtidos pelo Método de Asaoka Modificado.

Para a seção C (drenos de areia tipo ponta aberta), onde as curvas de recalques medidos estão bastante próximas entre si, obteve-se uma excelente concordância entre estas e a curva média calculada, a menos dos recalques devidos ao adensamento secundário.

Nas seções D (drenos de areia-jatos d'água) e F (drenos de geotêxtil), a curva média e o intervalo de confiança se encontram deslocados para baixo em relação ao conjunto de curvas medidas, resultado este que pode ter sido influenciado pela introdução de parâmetros da reta de Asaoka da segunda etapa de carregamento. A curva média medida porém estaria localizada dentro do intervalo de confiança da curva média calculada.

Observa-se que a aplicação desta metodologia gerou grandes intervalos de confiança, mesmo para a seção C. Esse fato ocorre, ainda que sejam pequenas as dispersões obtidas para os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$ .

O maior intervalo de confiança é observado na seção G e o menor é observado na seção F.

### VII.1.2 Recalques Finais

Os valores dos recalques finais obtidos através de análises pelo Método de Asaoka Modificado realizadas com  $\Delta t=30$  dias e  $\Delta t=60$  dias são bastante próximos, estando os recalques médios finais de uma análise, contidos nos intervalos de confiança da outra.

A máxima diferença relativa entre os valores médios obtidos pelas duas análises é igual a 3,1%, para a segunda etapa (seção B) e 1,4% para a terceira etapa (seção E).

Verifica-se que os valores de recalques finais calculados pelo Método de Asaoka Modificado nas seções com drenos são maiores que os das seções sem drenos verticais. Isto pode se dever ao fato de que a instalação dos drenos provocaria amolgamento do solo e conseqüente aumento no valor dos recalques.

A seção D (drenos de areia-jato d'água) apresentou os recalques mais elevados de todas as seções analisadas, tanto para a segunda como para a terceira etapa.

Para as seções sem drenos observaram-se recalques finais calculados para a 2ª etapa maiores na seção G que na seção A, estando esta diferença em torno de 12,4% na análise com  $\Delta t=30$  dias e 13,4% na análise com  $\Delta t=60$  dias. Isto pode se dever à diferença entre a largura do aterro nas duas seções, visto que a seção G foi construída com uma largura superior à da seção A.

As seções com drenos sintéticos (E e F) apresentaram valores de recalques finais praticamente iguais, levando-se em consideração os intervalos de confiança estabelecidos.

Os recalques finais por adensamento primário incluindo o carregamento da terceira etapa, calculados por TERRA (1988) segundo metodologia convencional, são respectivamente para as seções B, C, D, E, F e G, iguais a 2,04 m, 2,05 m, 2,14 m, 2,01 m, 2,05 m e 2,01 m. Estes valores estão contidos nos intervalos de confiança da média para os recalques finais calculados pelo Método de Asaoka Modificado para cada seção, com exceção da seção G.

As dispersões observadas para os recalques finais, avaliadas pelo coeficiente de variação, são da mesma ordem de grandeza daquelas observadas para  $\beta_0$ .

Em seguida será mostrado um procedimento para cálculo de recalques finais incluindo a parcela devida ao adensamento secundário, para efeito de comparação com os resultados desta tese.

### VII.1.3 Cálculo do Recalque Final Incluindo o Adensamento Secundário

Pode-se calcular de maneira expedita o valor de recalques finais incluindo a compressão secundária, adotando-se o procedimento apresentado por FEIJÓ (1991).

Segundo VIEIRA (1988), para se determinar o recalque total,

pode-se lançar mão da assertiva de que o processo de adensamento termina quando  $K_0$  (coeficiente de empuxo no repouso) atinge um valor limite. Desta forma, estimando-se o índice de vazios de equilíbrio, correspondente a esse  $K_0$  limite, pode-se obter o recalque total incluindo a parcela referente ao adensamento secundário.

Segundo FEIJÓ (1991), a argila do Sarapuí não deve apresentar compressão secundária para  $K_0=0,8$ , sendo o OCR correspondente aproximadamente igual a 2,0.

Assim, o que se deseja determinar é o índice de vazios correspondente à curva  $e \times \sigma'_v$  para  $K_0=0,8$ , sendo que este é obtido para o ponto C da figura VII.7 (OCR=2).

De posse do valor do índice de vazios correspondente a  $\sigma'_{vr}$  na linha OCR=2 (ponto C, figura VII.7), calcula-se a variação do índice de vazios em relação àquele correspondente a  $\sigma'_{vo}$ , obtendo-se o valor do recalque final.

Este procedimento foi aplicado utilizando-se a figura VII.8, retirada da tese de FEIJÓ (1991), resultante de ensaios realizados por este autor na argila do Sarapuí.

Adotaram-se parâmetros correspondentes aos da seção G para esta análise.

Para o cálculo do acréscimo de tensão vertical no centro da camada de argila na seção G ( $z=4,5$  m), foram utilizados os pesos específicos e dimensões apresentados no capítulo IV

deste trabalho, adotando-se o procedimento de cálculo de distribuição de tensões prescrito por NAVFAC-DM7 (1971).

A consideração do efeito de submersão foi feita adotando-se o método de CRUZ E SAES (1972), com  $m_v=0,003 \text{ m}^2/\text{kN}$ .

O índice de vazios correspondente a  $\sigma'_{vo}$  ( $e_{\sigma'vo}$ ) foi adotado como sendo igual a 3,69, de acordo com ORTIGAO (1980).

Para o centro da camada argilosa na seção G foram calculadas as seguintes tensões verticais finais:

$$\sigma'_{vf} \text{ (2ª etapa)} = 37,2 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_{vf} \text{ (3ª etapa)} = 51,7 \text{ kN/m}^2$$

obtendo-se a partir da figura VII.8 os seguintes índices de vazios finais:

$$e_f \text{ (2ª etapa)} = 2,78$$

$$e_f \text{ (3ª etapa)} = 2,42$$

Sendo:

$$S_{\infty} = \frac{\Delta e}{1 + e_{\sigma'vo}} \cdot H \quad (\text{VII.3})$$

obtém-se pela aplicação de (VII.3) para  $H=9,0 \text{ m}$ :



$S_{\infty}$  (2ª etapa)  $\approx$  1750 mm

$S_{\infty}$  (3ª etapa)  $\approx$  2440 mm

Verifica-se então, que grande parte dos recalques devidos ao carregamento até a 2ª etapa, calculados de acordo com este procedimento ( $S_{\infty}$ (2ª etapa)), estariam ainda por ocorrer quando da aplicação da terceira etapa de carregamento. Desta forma, as curvas Recalque x Tempo para a 3ª etapa estariam afetadas pelos recalques a ocorrer devidos à aplicação dos carregamentos das etapas anteriores.

Os recalques finais calculados por este procedimento são superiores àqueles determinados pelo Método de Asaoka Modificado (principalmente no que se refere ao recalque final para a 2ª etapa), o que se justifica pelo fato de que este último considera apenas recalques por compressão primária.

Estes recalques, no entanto, estão em concordância com aqueles calculados por TERRA (1988) para a seção G, pelo Método de TAN, que também leva em consideração a compressão secundária.

## VII.2 Análise dos Coeficientes de Adensamento

Devido ao grande número de variáveis envolvidas na análise em questão, nada se pode concluir acerca de valores absolutos de  $c_v$  e  $c_h$  para as seções com drenos. Pode-se no entanto realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos para essas seções.

As figuras VII.9 e VII.10 mostram os gráficos dos valores médios de  $c_v$  em função da relação  $c_h/c_v$ , respectivamente para a 2ª e 3ª etapas de carregamento, tendo sido estes valores retirados das tabelas VI.15 a VI.19 deste trabalho, para  $t=30$  dias.

Se nessas figuras traçam-se retas paralelas ao eixo horizontal, ou seja, retas de  $c_v$  constante, pode-se verificar que estas interceptam as curvas em diferentes valores da relação  $c_h/c_v$ .

Esperando-se que tanto  $c_v$  quanto a relação  $c_h/c_v$  sejam aproximadamente iguais para todas as seções, as diferenças observadas para a relação  $c_h/c_v$  entre as diversas seções, para um mesmo valor de  $c_v$ , se traduzem em diferenças de eficiência entre os drenos.

Verifica-se então nas figuras VII.9 e VII.10 que, desconsiderando-se as demais variáveis envolvidas, a seção D (drenos de areia - jatos d'água) apresenta maior eficiência e a seção B (drenos de areia - ponta fechada) a menor eficiência, tanto na 2ª quanto na 3ª etapa de carregamento. Esta diferença de eficiência mostra-se mais acentuada na 2ª etapa, o que é coerente com o fato de que a eficiência diminui com o passar do tempo para todos os tipos de drenos.

Pode-se afirmar ainda, da observação das figuras VII.9 e VII.10, que é baixa a eficiência de todos os tipos de drenos, já na ocasião da aplicação da segunda etapa de carregamento. Utilizando-se nestas figuras os valores de  $c_v$  cal-

culados para a seção G (sem drenos), são obtidos valores para a relação  $c_h/c_v$  menores que 0,3, muito inferiores à relação obtida em ensaios de laboratório, igual a 2,0.

Quanto às seções sem drenos, o valores de  $c_v$  encontrados para a seção G na 2ª e 3ª etapas de carregamento, onde já se teria atingido a fase normalmente adensada, mostram-se superiores àqueles apresentados na figura IV.15 para a mesma faixa de tensões. O mesmo acontece na 2ª etapa de carregamento para a seção A.

Isso pode se dever ao fato de que os recalques desenvolvidos por adensamento secundário, devidos à paralisação da construção do aterro durante um longo tempo entre a 1ª e 2ª etapas de carregamento, podem ter afastado para a esquerda a curva de compressão e  $\times \sigma'_v$  gerando uma falsa tensão de sobreadensamento (tensão crítica ou de quasi-sobreadensamento) (ver BJERRUM, 1967 e VIEIRA, 1988). Assim, o comportamento do material continuaria a ser o de uma argila sobreadensada com valores de  $c_v$  superiores ao esperado para a fase normalmente adensada.

Além disso, o fato de que o adensamento secundário possa estar ocorrendo de forma significativa em relação ao primário, durante todo o processo de adensamento, pode modificar a forma das curvas, e conseqüentemente, os resultados das análises, que se baseiam na hipótese de que o adensamento secundário se inicia após o término do primário.

### VII.2.1 Análise de $c_v$ Pelo Método de Asaoka Modificado Para Curvas Teóricas Afetadas do Adensamento Secundário

Os resultados de  $c_v$  obtidos pela análise através do Método de Asaoka Modificado, como já foi dito, mostram-se muito superiores àqueles determinados em laboratório para esta faixa de tensões por COUTINHO E LACERDA (1976).

Com o propósito de esclarecer a questão da influência do adensamento secundário ocorrendo de forma simultânea com o primário, é feita aqui uma análise de curvas Recalque x Tempo teóricas, geradas a partir da formulação matemática para o mecanismo de compressão secundária proposta por MARTINS E LACERDA (1985) e apresentada por VIEIRA (1988), mostrada a seguir:

$$U = \frac{S(t)}{S_\infty} = \frac{\left( \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} - 1 \right) \cdot \left[ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{N^2} \exp(-N^2 \cdot T_v) \right]}{\left( \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} - 1 \right) + \frac{2}{3} (1 - K_{on})} + \frac{\frac{2}{3} (1 - K_{on}) \cdot [1 - \exp(\theta \cdot T_v)]}{\left( \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} - 1 \right) + \frac{2}{3} (1 - K_{on})} \quad (VII.4)$$

onde:

$\sigma'_{vf}$  é a tensão efetiva vertical final ( $\sigma'_{vf} = \sigma'_{vo} + \sigma_v$ );

$\sigma'_{vo}$  é a tensão vertical efetiva inicial;

$K_{on}$  é o coeficiente de empuxo no repouso de um solo normalmente adensado, dado por  $K_{on}=1-\text{sen } \phi'$ ;

$\theta$  é o parâmetro que regula a velocidade com que a compressão secundária se manifesta.

$$N = (\pi/2) \cdot (2n+1)$$

O procedimento consiste em se calcular, pela equação (VII.3) (foram utilizados aqui 3 termos da série), os valores de recalques para tempos equiespaçados de  $\Delta t$ , obtendo-se assim a construção de Asaoka e calculando-se ao longo da mesma, os valores de  $c_v$ . Aqui foi utilizado  $\Delta t=60$  dias.

As curvas Recalque x Tempo foram construídas visando simular aquelas geradas por um carregamento aplicado em etapa única na argila do Sarapuí para a seção G do aterro.

Assim adotaram-se:

o valor de  $\theta$ , a partir de  $\theta=0,8 \times 10^{-5}$  obtido por VIEIRA (1988) para uma amostra de 1 cm de altura, como sendo igual a 20 para a altura de drenagem de 4,5 m;

o valor de  $K_{on}$  igual a 0,58 ( $\phi'=25^\circ$ );

o valor de  $c_v$  igual a  $1,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  em concordância com a figura IV.15.

o valor do recalque final  $S_{\infty}$  igual a 700 mm, correspondente aproximadamente à diferença entre o recalque final para a 3ª etapa e o recalque final para a 2ª etapa calculados em VII.1.3.

Segundo VIEIRA (1988), de acordo com a formulação apresentada, a compressão secundária será tanto menor em relação ao adensamento primário, quanto maior for a relação  $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$ , sendo que quando esta tende ao infinito a expressão (VII.4) se transforma na solução de Terzaghi.

A figura VII.11 mostra a variação de  $c_v$  ao longo da construção de Asaoka para diferentes relações  $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$ , a fim de que se possa observar a influência do adensamento secundário na aplicação do método de Asaoka.

Observando-se a referida figura pode-se notar que o valor de  $c_v$  é superestimado pela análise para os tempos iniciais, sendo que para os tempos finais chega-se ao valor de  $c_v = 1,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  com o qual as curvas Recalque x Tempo foram geradas. Quanto menor é a relação  $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$  maior é o tempo de observação necessário para que se obtenha o  $c_v$  esperado.

Para a seção G, por exemplo, a relação  $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$  é aproximadamente igual a 1,4, valor para o qual o adensamento secundário ocorre simultaneamente ao adensamento primário representando uma parcela significativa do processo de adensamento. Nesse caso só seria possível obter o valor correto de  $c_v$  quando já houvessem ocorrido os recalques na sua qua-

se totalidade.

Desta maneira torna-se possível afirmar que os resultados da análise dos recalques pelo Método de Asaoka Modificado realizada para o Aterro Experimental II foram bastante influenciados pelo adensamento secundário.

Para  $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}=10^7$  os valores de  $c_v$  obtidos convergem rapidamente para o valor esperado e assim, com um menor tempo de observação de recalques seria possível chegar-se a resultados satisfatórios.

Esse é o caso do aterro da subestação São José (ver COPPETEC, 1990) construído sobre a argila do Sarapuí, para o qual o  $c_v$  encontrado pelo método de Asaoka situou-se na faixa de  $1,0 \times 10^{-8}$  a  $2,0 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, coerente com as faixas encontradas para os ensaios oedométricos de laboratório e para ensaios de piezocone, respectivamente variando de  $0,9 \times 10^{-8}$  a  $3,0 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s e  $1,0 \times 10^{-8}$  a  $2,0 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s. Esse aterro tem altura aproximadamente igual a 25 m sobre uma camada de argila mole de 3,0 m de espessura.

Tempo (dias)

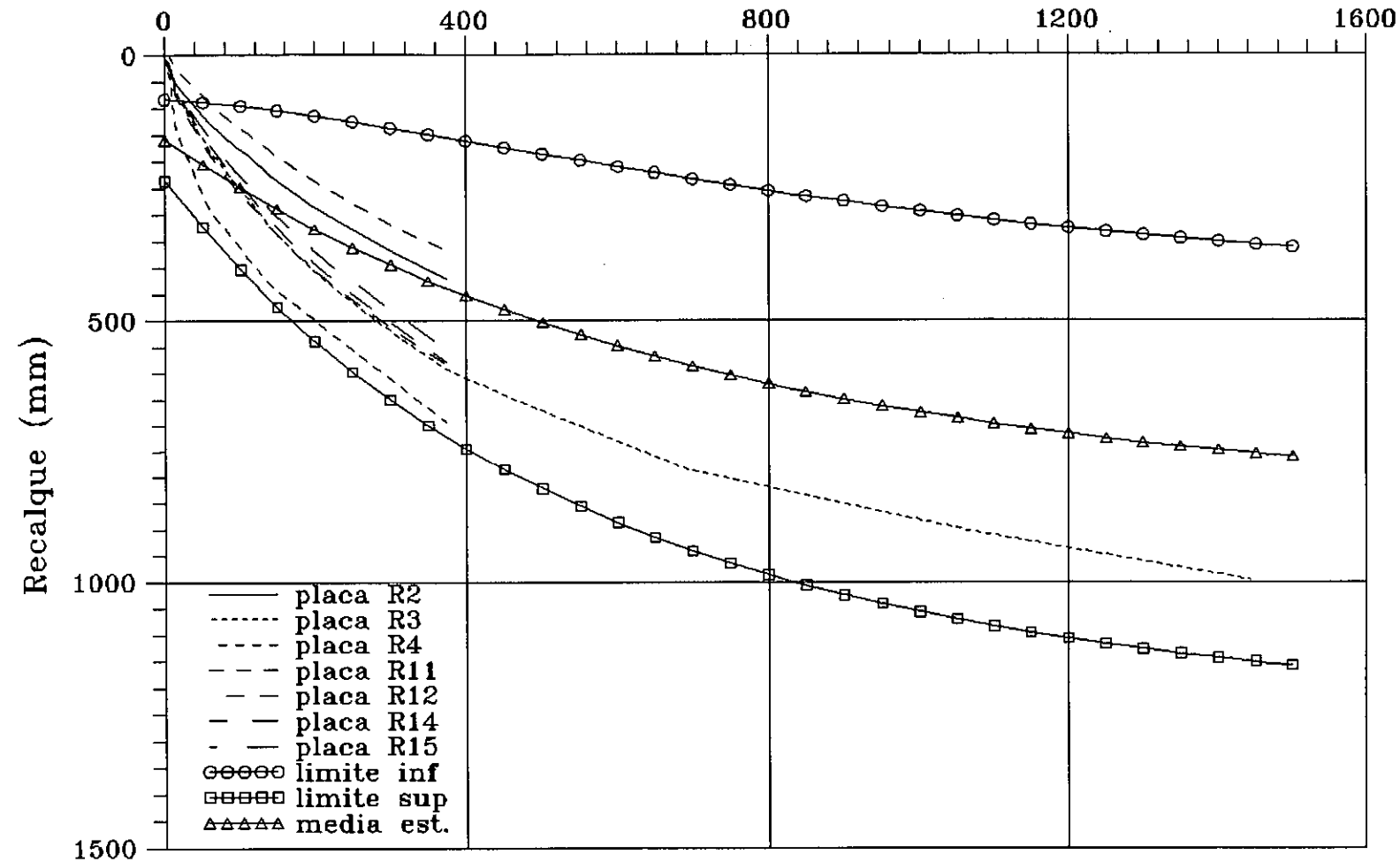


Fig. VII.1 - Curvas Recalque x Tempo - Seção B - 3ª etapa  
 Comparação com resultados obtidos através de  
 análise pelo Método de Asaoka Modificado



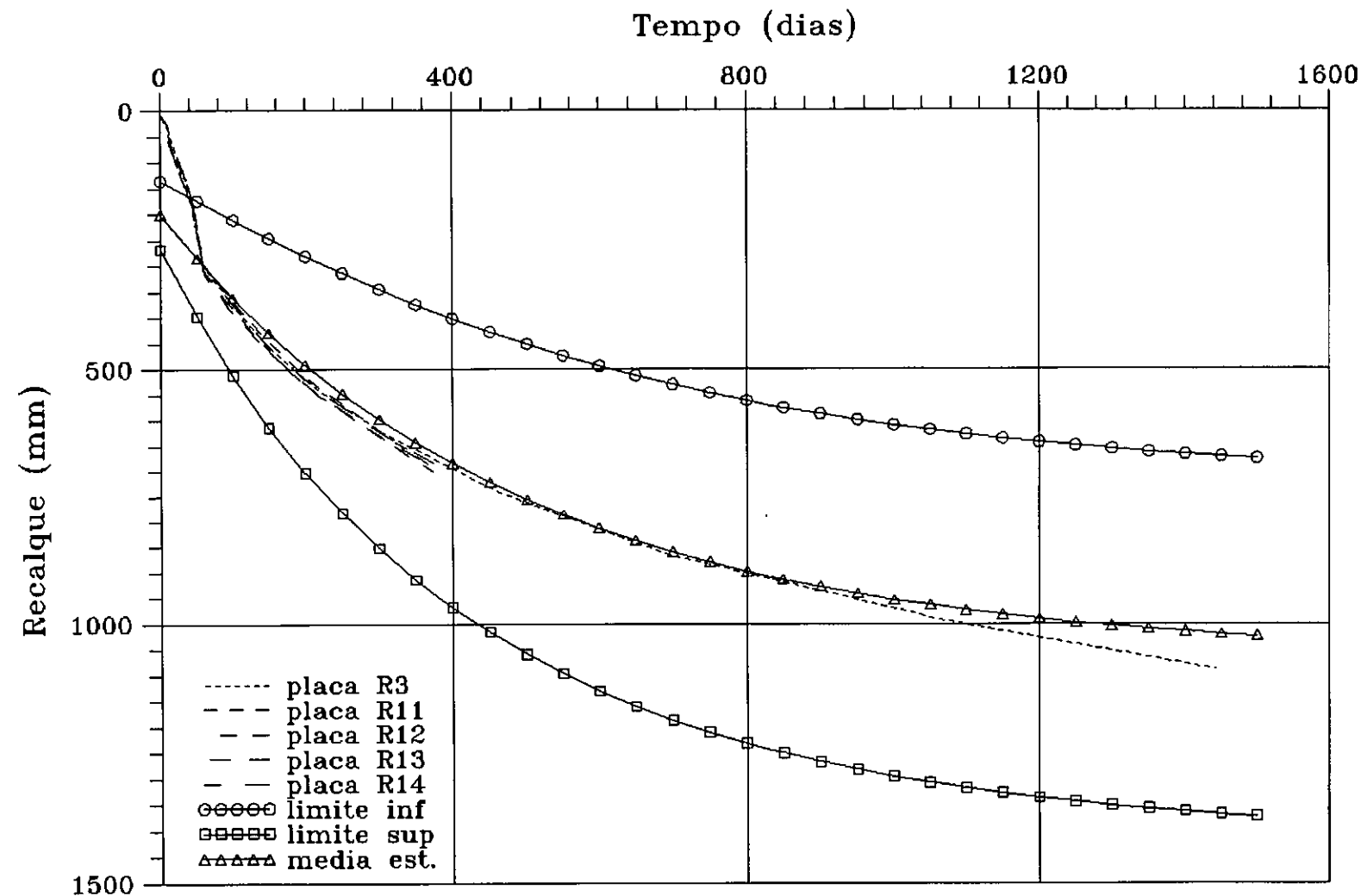


Fig. VII.2 - Curvas Recalque x Tempo - Seção C - 3ª etapa  
 Comparação com resultados obtidos através de  
 análise pelo Método de Asaoka Modificado

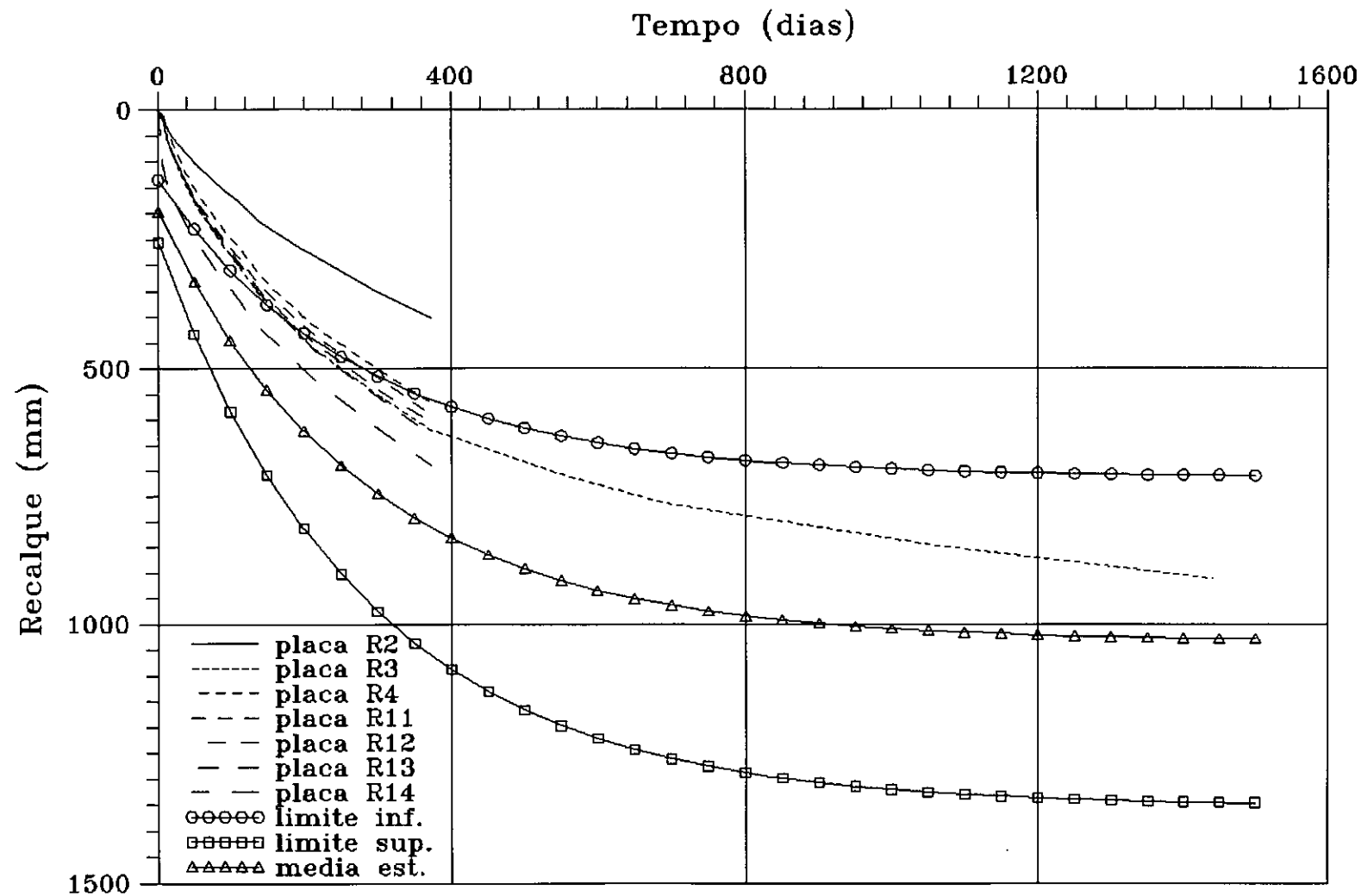


Fig. VII.3 - Curvas Recalque x Tempo - Seção D - 3ª etapa  
 Comparação com resultados obtidos através de  
 análise pelo Método de Asaoka Modificado

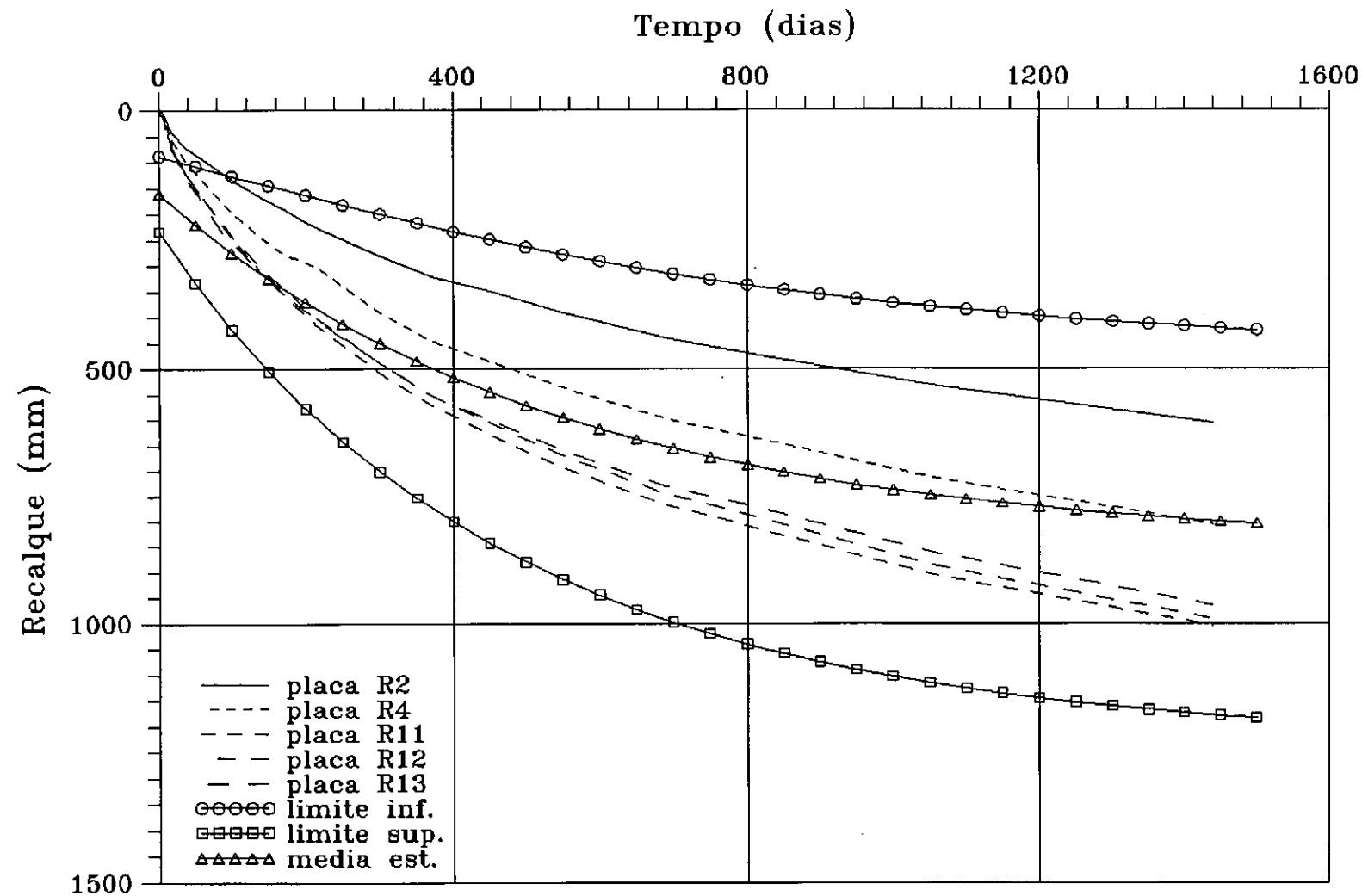


Fig. VII.4 - Curvas Recalque x Tempo - Seção E - 3ª etapa  
 Comparação com resultados obtidos através de  
 análise pelo Método de Asaoka Modificado

Tempo (dias)

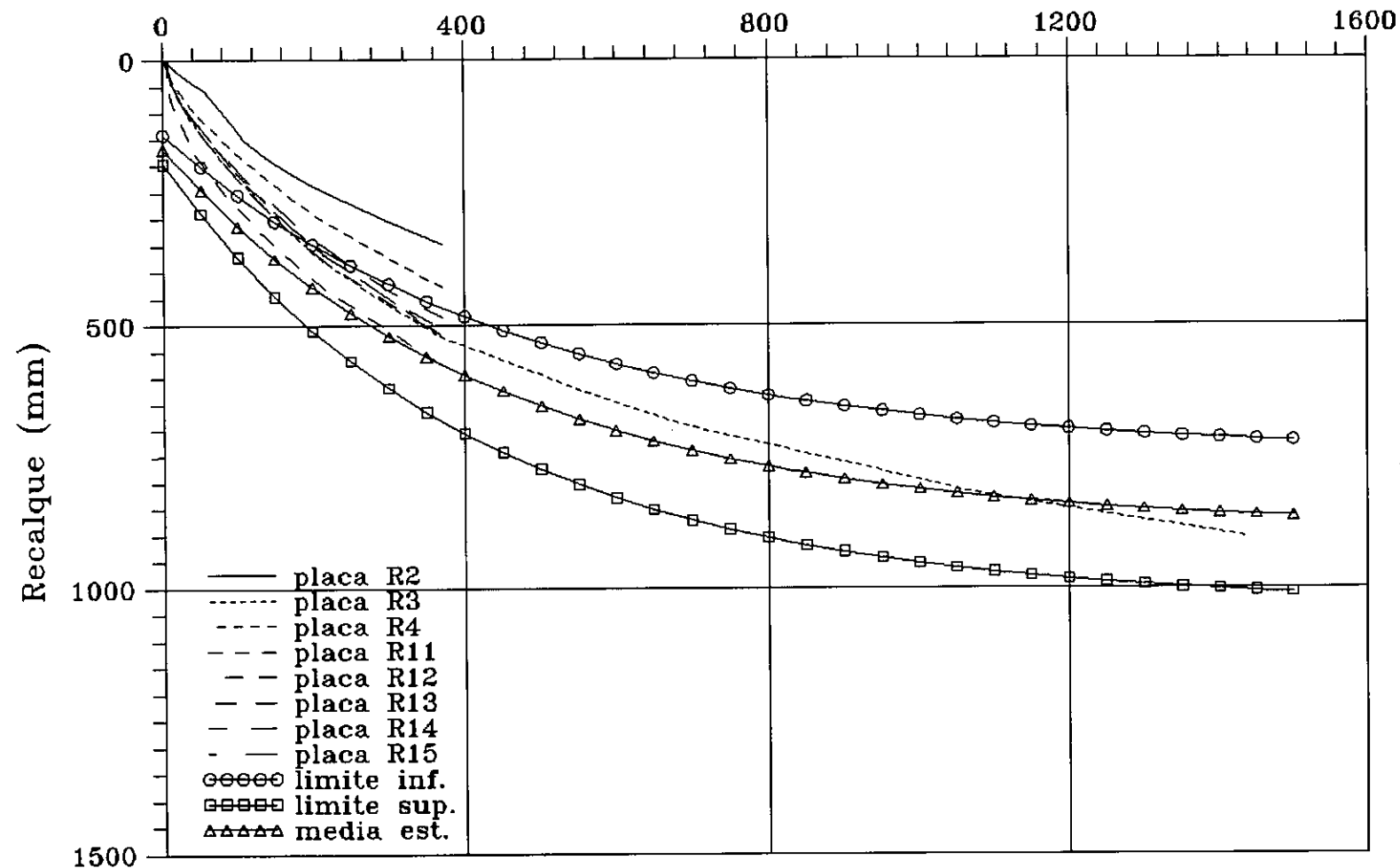


Fig. VII.5 - Curvas Recalque x Tempo - Seção F - 3ª etapa  
 Comparação com resultados obtidos através de  
 análise pelo Método de Asaoka Modificado

Tempo (dias)

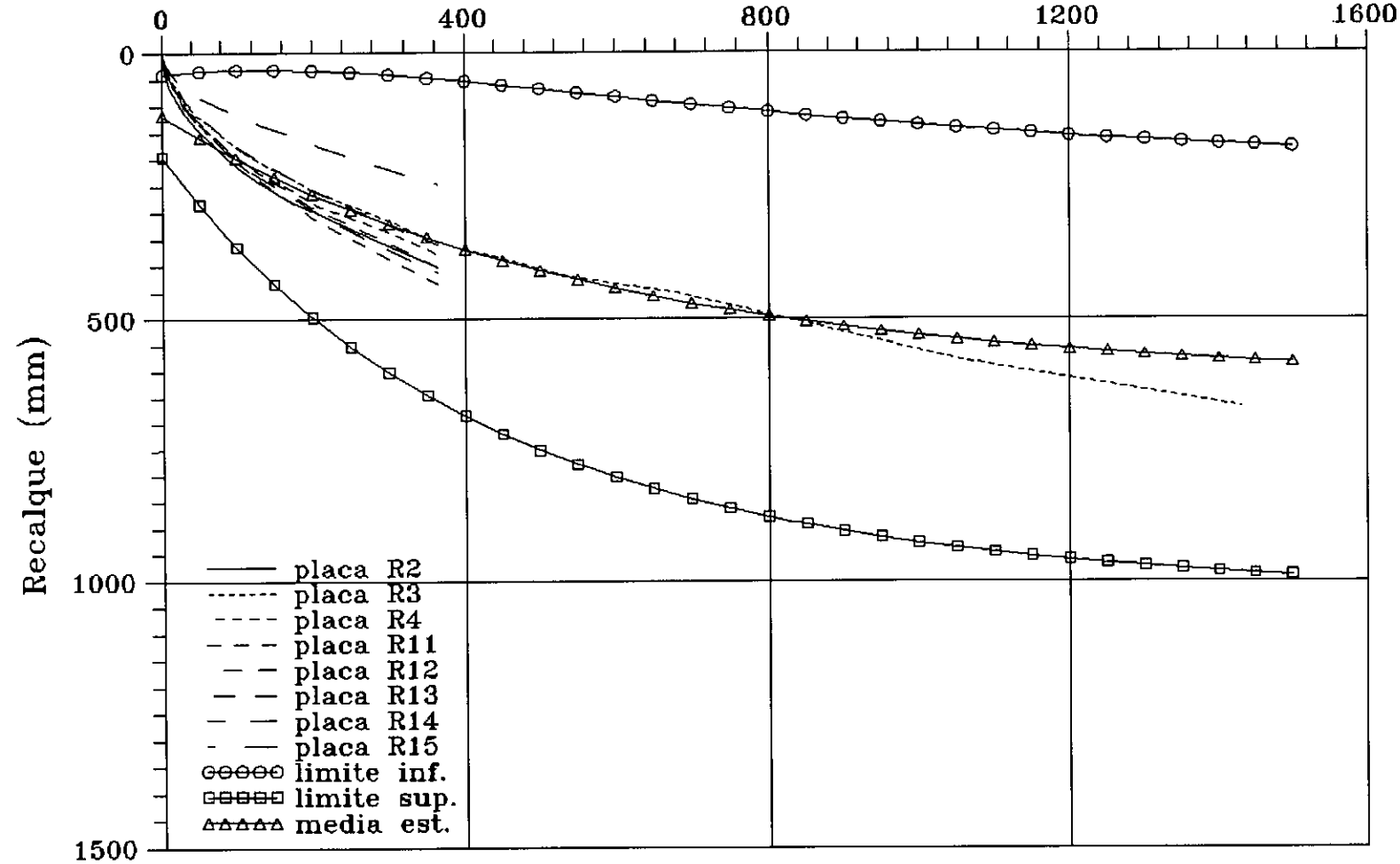


Fig. VII.6 - Curvas Recalque x Tempo - Seção G - 3ª etapa  
 Comparação com resultados obtidos através de  
 análise pelo Método de Asaoka Modificado

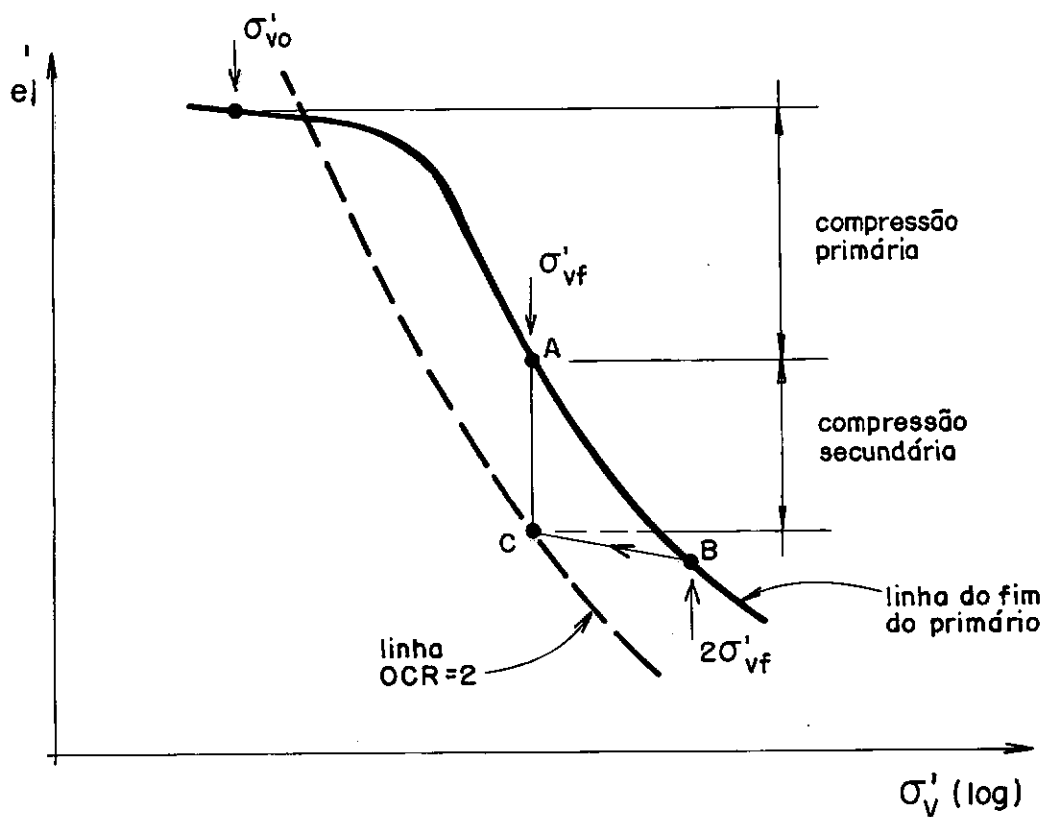


Figura VII.7 - Procedimento para a estimativa do recalque total na Argila do Sarapuú (APUD FEIJÓ, 1991).

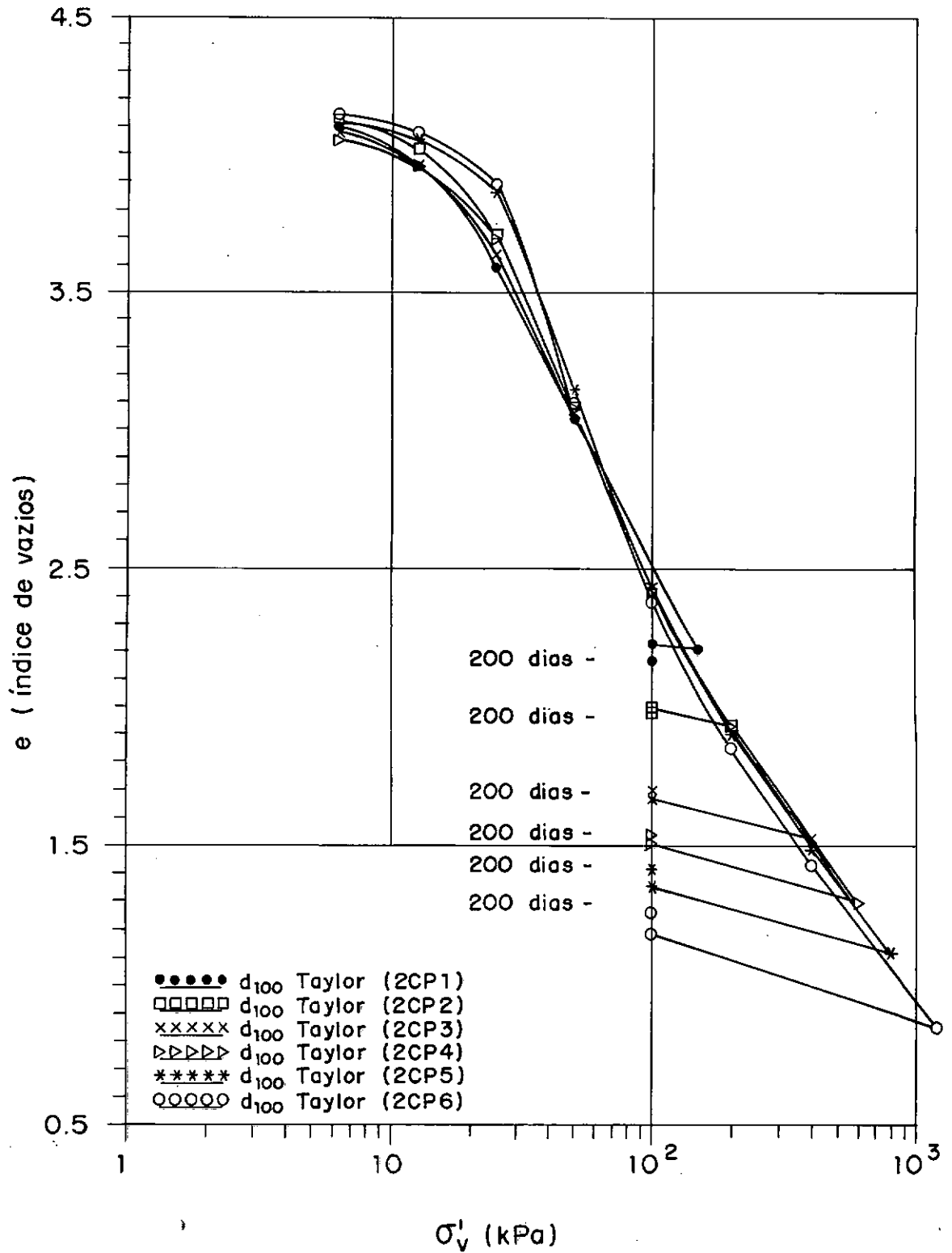


Figura VII.8 -  $e \times \log \sigma'_v$  (escala log.) - ( APUD FEIJÓ, 1991 )

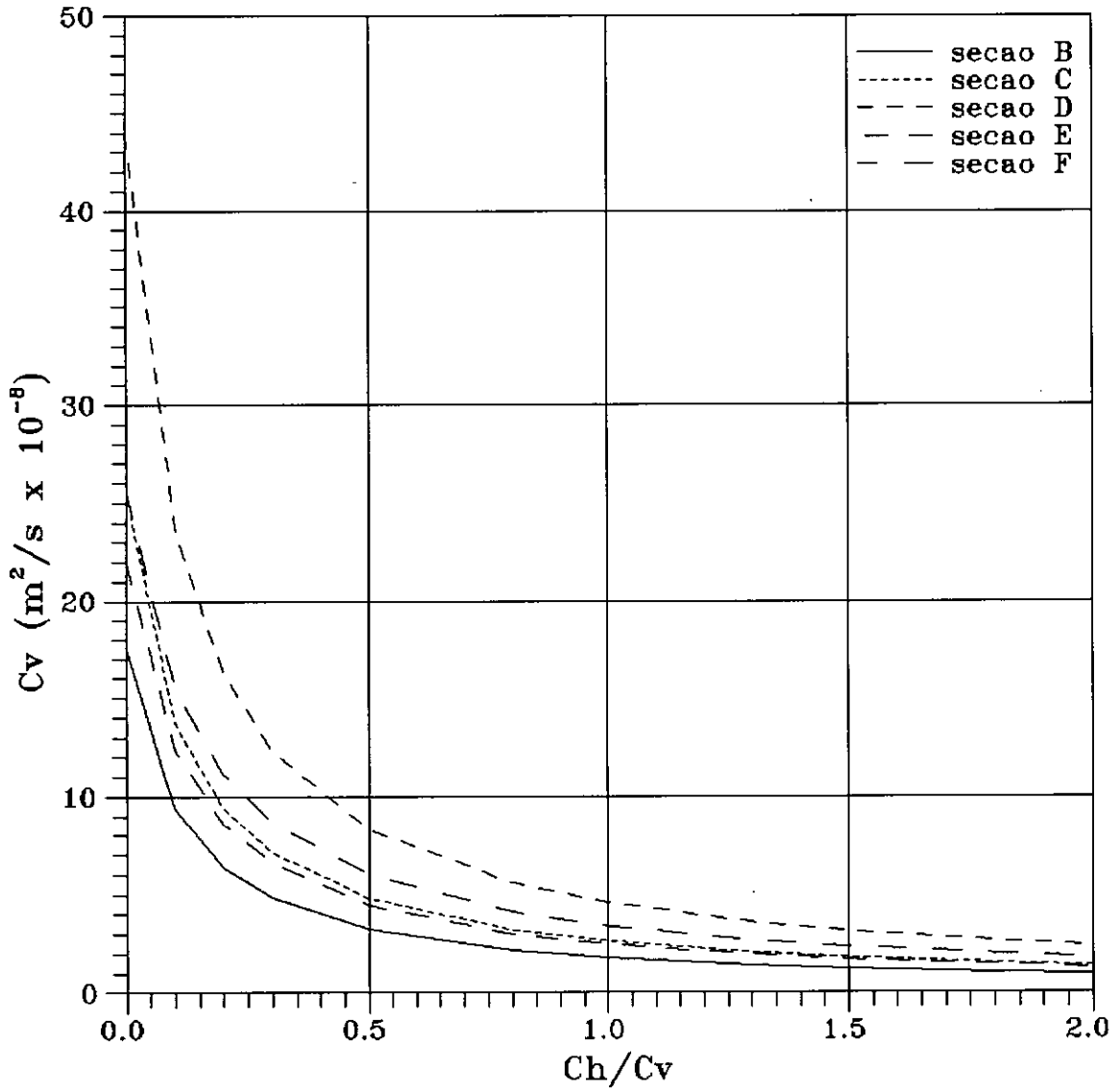


Fig. VII.9 - Variação dos valores de  $c_v$  (médios) com a relação  $c_b/c_v$  - Resultados obtidos através da análise pelo Método de Asaoka Modificado para as seções com drenos - 2ª etapa



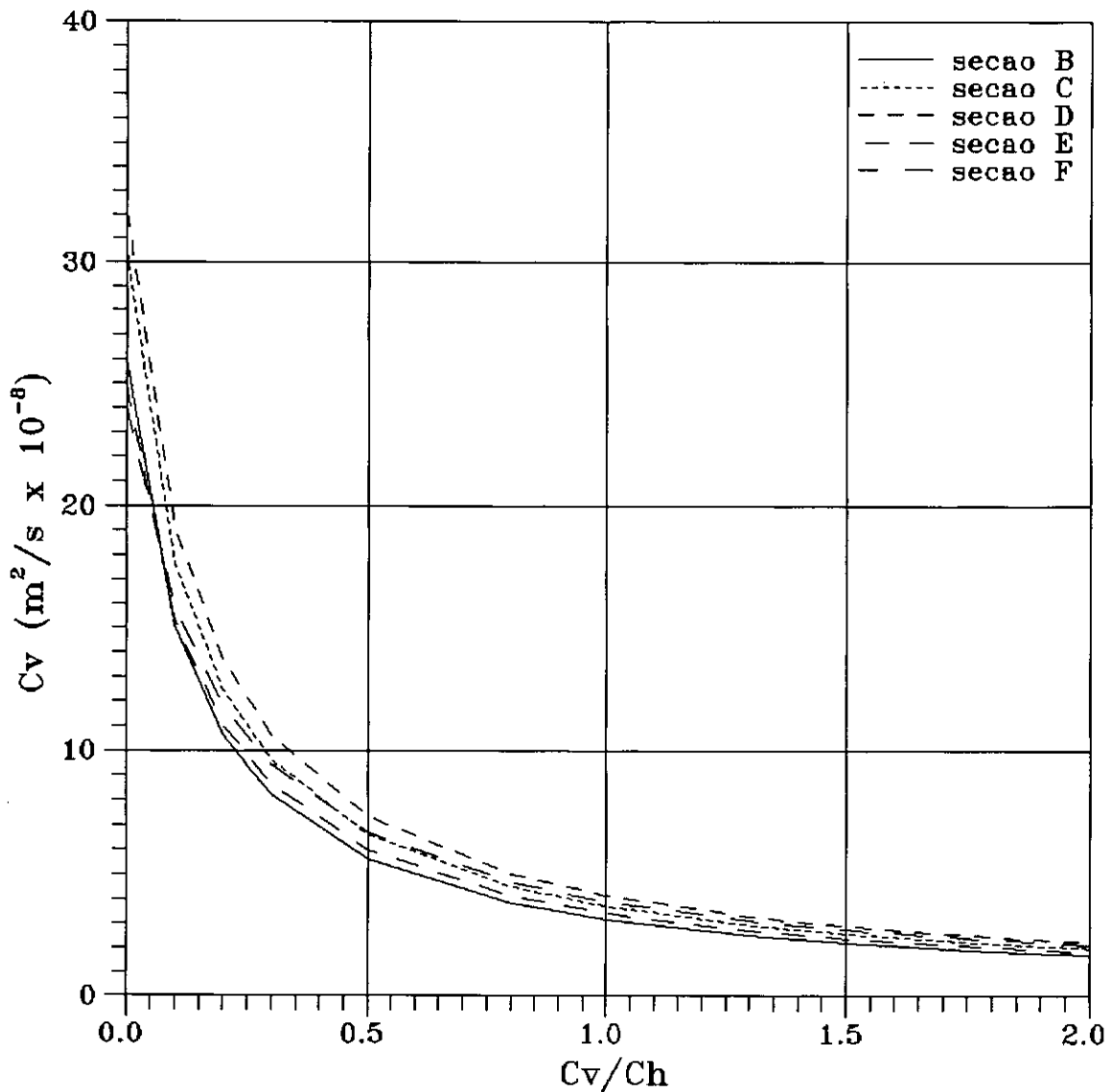


Fig. VII.10 - Variação dos valores de  $c_v$  (médios) com a relação  $c_h/c_v$  - Resultados obtidos através da análise pelo Método de Asaoka Modificado para as seções com drenos - 3ª etapa

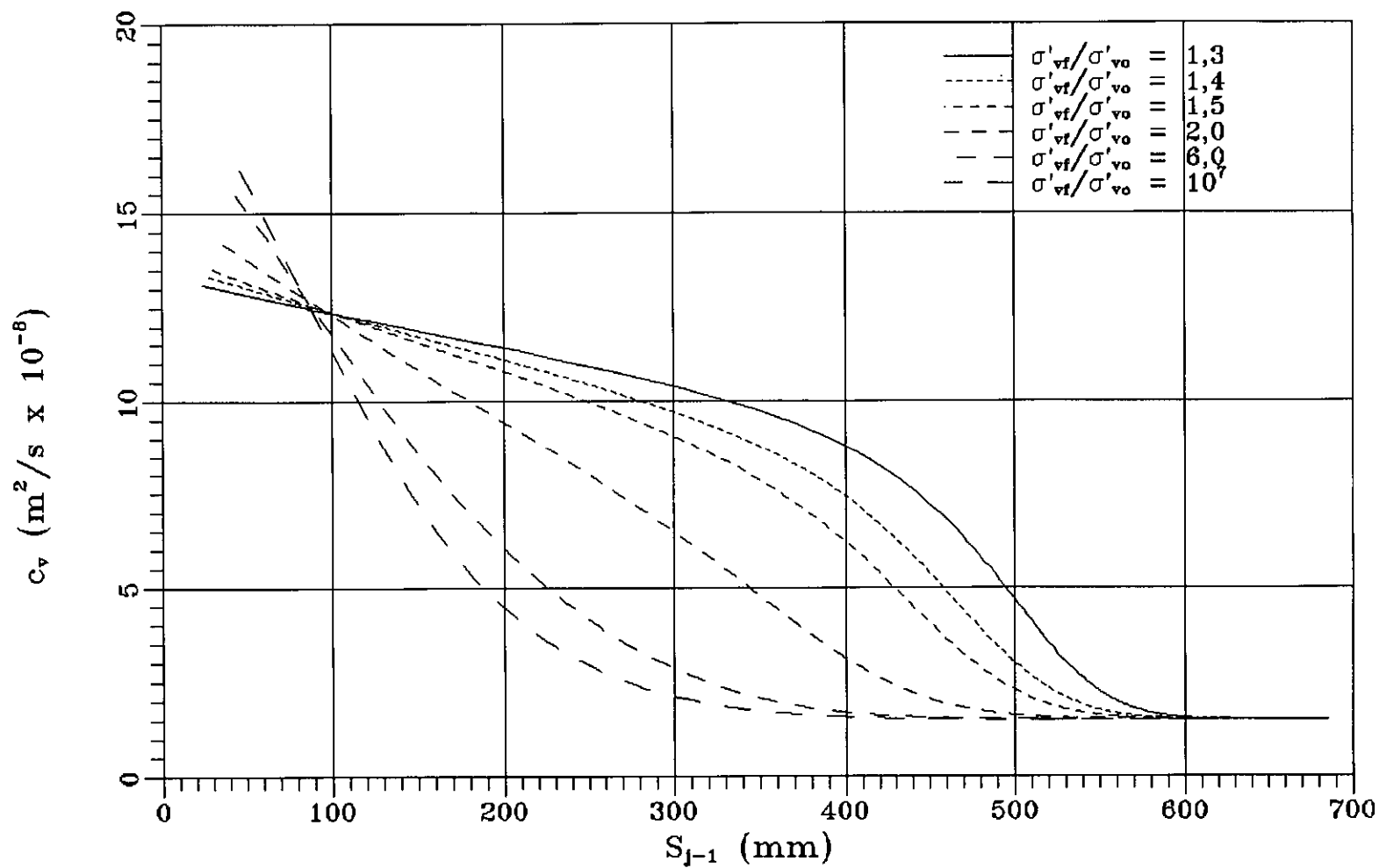


Fig. VII.11 - Curvas de variação de  $c_v$  ao longo das construções de Asaoka para diversos valores da relação  $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$

## CAPITULO VIII

### Considerações Finais, Conclusões e Sugestões Para Pesquisa

#### VIII.1 Considerações Finais

(1) A construção do aterro em três etapas, bem como a longa interrupção entre a primeira e segunda etapas de carregamento, introduziram dificuldades significativas na análise dos recalques medidos pelo Método de Asaoka Modificado, no que concerne à sua aplicação e interpretação dos resultados.

(2) O número reduzido de seções sem drenos (A e G), impossibilitou uma melhor avaliação das diferenças de comportamento entre estas e as seções com drenos (B, C, D, E e F). Isto é agravado pelo fato de que na seção A, a forma de carregamento, bem como o tipo de colchão drenante (geotêxtil) são diferentes dos das demais seções (areia).

Seria aconselhável, além de um número maior de seções sem drenos, a existência de zonas de transição entre seções.

(3) O acompanhamento da instrumentação, quanto à manutenção e atualização de banco de dados das informações obtidas, deveria ter sido tratado de forma mais cuidadosa. Desta forma não se teriam perdido informações valiosas.

## VIII.2 Conclusões

- (1) Não devem ser feitos ajustes matemáticos ou manuais nas curvas Recalque x Tempo, para efeito de determinação dos recalques espaçados de um intervalo de tempo constante, visando-se obtenção da construção de Asaoka.

Resultados mais confiáveis são obtidos quando se constroem as curvas Recalque x Tempo ligando-se os pontos por segmentos de reta, o que equivale a dizer que os recalques desejados são obtidos por interpolação linear entre duas medidas de recalque consecutivas.

- (2) Da mesma forma, não devem ser lançados em um mesmo gráfico os pontos obtidos em diferentes placas, visando-se a construção de uma única reta de Asaoka.

- (3) O valor escolhido para o intervalo de tempo tem pouca influência nos resultados, desde que seja coerente com o tempo de observação dos recalques medidos.

- (4) A aplicação do Método de Asaoka a argilas de alta compressibilidade e baixa permeabilidade, para obras onde a relação  $\sigma'_{vz}/\sigma'_{vo}$  seja muito baixa (levando-se também em consideração a relação  $\sigma'_{vm}/\sigma'_{vo}$ ), leva a resultados enganosos devidos aos recalques por compressão secundária, não desprezíveis em relação aos recalques por compressão primária, desenvolvidos nesta condição.

Conclui-se assim, que o Método de Asaoka não deve ser

utilizado em solos sujeitos a adensamento secundário acentuado.

- (5) O adensamento secundário não foi desprezível e levou a que esta análise superestimasse os valores de coeficientes de adensamento.
- (6) Os valores estimados dos recalques finais nas seções com drenos são maiores que aqueles nas seções sem drenos de acordo com a análise efetuada.
- (7) É baixa a eficiência dos drenos, sendo que os drenos de areia tipo jato d'água se apresentaram como sendo os mais eficientes e os drenos de areia tipo ponta fechada os de menor eficiência, de acordo com a análise efetuada neste trabalho.
- (8) Grande parte dos recalques devidos à aplicação da 1ª e 2ª etapas de carregamento ainda estavam por ocorrer quando da aplicação da terceira etapa de carregamento.
- (9) As conclusões (6) e (7) colocam em questionamento a utilização de drenos verticais para a aceleração de recalques.

### VIII.3 Sugestões para Pesquisa

- (1) Retroanálise dos recalques medidos nas placas sob o Aterro Experimental II do Sarapuí, pelo método de TAN (1971) com enfoque probabilístico.

- (2) Retroanálise dos dados de recalques dos extensômetros magnéticos verticais, por um ou mais métodos apresentados no capítulo II, para avaliação da variabilidade dos parâmetros obtidos ao longo da profundidade.
- (3) Estudo comparativo entre dados de piezometria e medições de recalque, no Aterro II.
- (4) Estudo probabilístico direcionado ao processo simultâneo de adensamento primário e secundário com base na equação (VII.4), visando previsões de recalques mais realistas.
- (5) Realização de ensaios de dissipação com piezocone sob o Aterro II, com vistas à determinação de coeficientes de adensamento horizontal ( $c_h$ ) na situação atual.
- (6) Em caso de execução de novos aterros experimentais, sugere-se a realização de monitoramento durante a execução dos drenos de forma a se verificar um possível efeito de levantamento da superfície livre do depósito ("heave") provocado pelos mesmos.
- (7) Realização de amostragem local para verificação do índice de vazios atual da argila mole.
- (8) Realização de amostragem local para verificação da situação atual dos drenos em termos de colmatação.

## BIBLIOGRAFIA

ABOSHI, H. e MONDEN, H. (1963), «Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation of an Alluvial Clay», Proc. 4<sup>th</sup> Australia-New Zealand C.S.M.F.E., Adelaide, p.p.159-164.

ADASHI, K. e MIYRAHAMA, K. (1963), «Test Fill on Soft Ground», Soil and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.III, nº 2, março, p.p.63-80.

ALDRICH, H.P. e JOHNSON, E.G. (1972), «Embankment Test Sections to Evaluate Field Performance of Vertical Sand Drains for Interstate 295 in Portland, Maine», Highway Research Record, Washington, D.C., nº 405, p.p.60-74.

ALMEIDA, M.S.S. (1981), Analysis of the Behavior of an Embankment on Soft Clay, M. Phil. thesis, Universidade de Cambridge, Inglaterra.

ANDRADE LIMA, L.S. de (1991), Uma Metodologia para Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

ANG, A.H.S. e TANG, W.H. (1984), Probability Concepts in Engineering Planning and Design, vol.II, John Wiley & Sons, Inc., Nova York, E.U.A.

ANTUNES, F. (1976), Características Geotécnicas de Argilas Moles da Baixada Fluminense, Relatório parcial de pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), DNER.

ANTUNES, F. (1978), «Ensaio para Caracterização Mineralógica, Pedológica e Geológica das Argilas do Rio de Janeiro», IPR-DNER, Report. 2.019- 02/10/42, pp.33-119.

ASAOKA, A. (1978), «Observational Procedure of Settlement Prediction», Soil and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.18, nº4, dez, pp. 87-101.

BAECKER, G.B. (1981), «Optimal Estimators for Soil Properties», Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the Asce, vol. 107, nº GT5, May.

BALASUBRAMANIAM, A.S. e BRENNER, R.P. (1981), «Consolidation and Settlement of Soft Clay», Soft Clay Engineering, editado por Brand, E.W. e Brenner, R.P., capítulo 7, pp.481-557.

BARRON, R.A. (1948), «Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells», Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Transactions, paper nº 2346, vol.113, pp.718-754.

BJERRUM, L. (1967), «Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine clays as Related to Settlements of Buildings», Géotechnique, vol.17, pp.81-118.



CARRILLO, N. (1942), «Simple Two or Three Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils», Journal of Mathematics and Physics, Harvard University, Graduate School of Engineering, Cambridge, Mass.

COLLET, H.B. (1978), Ensaio de Palheta de Campo em Argilas Moles da Baixada Fluminense, Tese M. Sc., COPPE/UFRJ.

COLLET, H.B. (1982), Análise de Comportamento de Dispositivos de Drenagem em Aterro Experimental, relatório final, IPR, MT - DNER.

COLLET, H.B. (1983), O Aterro Experimental II do IPR : da Sua Concepção a uma Análise de Recalques, relatório de pesquisa, IPR, DNER.

COLLET, H.B. (1985), O Aterro Experimental II do IPR : da Sua Concepção a uma Análise de Recalques, tese para concurso para Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade federal Fluminense.

COPPETEC (1990), Análise do Comportamento do Aterro da Subestação São José Através de Instrumentação de Campo, Relatório II, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, julho.

COSTA FILHO, L.M., ARAGAO, C.J.G. e VELLOSO, P.P.C. (1985), «Características Geotecnicas de Alguns Depósitos de Argila Mole na Area do Grande Rio de Janeiro», Solos e Rochas, ABMS, vol. 8, nº 1, abril, pp.3-13.

COUTINHO, R.Q. (1976), Características de Adensamento com Drenagem Radial de Uma argila Mole da Baixada Fluminense, Tese MSc, COPPE, UFRJ.

COUTINHO, R.Q. e LACERDA, W.A. (1976), Características de Adensamento com Drenagem Radial e Vertical da Argila Cinza do Rio de Janeiro, relatório de pesquisas 2019-02.02 - 2/03/42, IPR.

CRUZ, P.T. e SAES, S.L. (1972), Problemas de Mecânica dos Solos, Escola Politécnica da USP, Departamento de publicações.

DANZIGER, F.A.B. (1990), Desenvolvimento de Equipamentos para Realização de Ensaios de Piezocone: Aplicação em Argilas Moles, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ.

DUARTE, A.E.R. (1977), Características de Compressão Confinada da Argila Mole no Rio Sarapuí no Km 7.5 da Rodovia Rio-Petrópolis, Tese M.Sc, PUC-RJ.

ELLSTEIN, A. (1971), «Settlement Prediction through the Sinking Rate», Revista Latino Americana de Geotécnica, vol. 1, nº 3, p.p.231-237.

ELLSTEIN, A. (1972), «Settlement Development : Observed vs Predicted», Proceedings ASCE Specialty Conference on Perform. of Earth and Earth Supported Structures, Purdue, LaFayette, ind., vol. 1-2, pp.1073-1085.

ESCARIO, V. e URIEL, S. (1961), «Determining the Coefficient of Consolidation and Horizontal Permeability by Radial drainage», Proc. Vth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engg., Paris, vol. 1, pp.83-87.

FEIJÓ, R.L. (1991), Relação entre a Compressão Secundária, Razão de Sobreedensamento e Coeficiente de Empuxo no Repouso, Tese M.Sc, COPPE/UFRJ.

GERSCOVICH, D.S., COSTA FILHO, L.M. e BRESSANI, L.A. (1986), «Propriedades Geotécnicas da Camada Ressecada de Um Depósito de Argila mole da Baixada Fluminense», Anais do VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, vol. II, MS-1 : Solos, Porto Alegre, pp.289-300.

GOULD, J.P. (1944), «Analysis of Pore Pressure and Settlement Observations at Logan International Airport», Harvard Soil Mechanics Series, nº 34, Harvard University, Dec.

HANSBO, S. (1979), «Consolidation of clay by Band-Shaped Pre-Fabricated Drains», Ground Engineering, July, vol. 12, nº 5.

HOLTZ, R.D., JAMIOLKOWSKI, M., LANCELLOTA, R. e PEDRONI, S. (1987), Performance of The Fabricated Band-Saped Drains, relatório CIRIA, rps. 364.

JOHNSON, S.J. (1970), «Foundation Precompression with Vertical Sand Drains», Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol.96, SM1, jan., p.p.145-175.

KJELLMAN, W. (1948), «Accelerating Consolidation of Fine Grained Soils by Means of Cardboard Wicks», 2ème Congrès International de Mecanique des Sols et des Travaux de Fondation, Rotterdam, vol. 2, pp.302-305.

KRIZEK, R.J., COROTIS, R.B. e EL-MOURSI, H.H. (1977), «Probabilistic Analysis of Predicted and Measured Settlements», Canadian Geotechnical Journal.

LACERDA, W.A., COSTA FILHO, L.M., COUTINHO, R.Q. e DUARTE, A.R. (1977), «Pesquisa sobre Mecânica dos Solos, Aterros sobre Solos Compressíveis - Carac. de Adens. da Argila Mole do Rio de Janeiro», Simpósio Internacional sobre Argilas Moles, Bangkok, Tailândia.

LAMBE, T.W. e WHITMAN, R.S. (1969), Soil Mechanics, John Wiley & Sons, inc.

LONG, R.P. e CAREY, P.J. (1978), «Analysis of Settlement Data from Sand-Drained Areas», Transportation Research record, Washington, nº 678, pp.37-40.

LUMB, P. (1966), «The Variability of Natural Soils», Canadian Geotechnical Journal, vol. 3, nº 2, pp.74-97.

LUMB, P. (1967), «Statistical Methods in Soil Investigations», Procedures of 5th Australia - New Zeland Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.26-33.

LUMB, P. (1970), «Safety Factors and the Probability Distribution of Soil Strength», Canadian Geotechnical Journal, vol. 7, n° 3, pp.225-242.

LUMB, P. (1974), «Application of Statistics in Soil Mechanics», Soil Mechanics - New Horizons, J.K. Lee ed., Newnes, Butterworths co., pp.44-111.

MAGNAN, J.P. (1983), «Théorie et Pratique des Drains Verticaux», Technique et Documentation (Lavoisier).

MAGNAN, J.P. e DERROY, J.M. (1980), «Analyse Graphique des Tassement Observés Sous les Ouvrages», Bull-Liaison Laboratoire des Ponts e Chaussées, 109, set-out, Paris, pp.9-21.

MAGNAN, J.P. e MIEUSSENS, C. (1980), «Le Remblais d'Essai: Un Outil Efficace pour Améliorer les Projets d'Ouvrages sur Sols Compressibles», Bull-Liaison Laboratoire des Ponts e Chaussées, 106, mar-abr, Paris, pp.79-96.

MAGNAN, J.P., PILOT, G. e QUEYROI, D. (1983), «Back Analysis of Soil Consolidation Around Vertical Drains», Proceedings of VIII ECSMFE, Helsinki.

MARTINS, I.S.M. e LACERDA, W.A. (1985), «A Theory of Consolidation with Secondary Compression», Proceedings of 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, p.p. 567-570.

MASSAD, F. (1982), «Método Gráfico para o Acompanhamento da Evolução dos Recalques com o Tempo», Anais do VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, setembro, Olinda/Recife, PE, pp.321-332.

MASSARSCH, K.R. e KARNON, M. (1983), «Performance of Driven Sand Drains», proceedings of VIII ECSMEE, Helsinki.

MATSUO, H. (1953), «Consolidation of Soft Foundation Ground and treatment», Chugoku-Shikoku Branch, Japanese Soc. of Civ. Engng., agosto.

MIKASA, M. (1963), «The Consolidation of Soft Clay - a New Consolidation Theory and its Application», Sinopsis of ISCE, prize papers for 1964.

MORAN, Proctor, Mueser e Rutledge (1958), Study of Deep Soil Stabilization by Vertical Sand Drains, Bureau Yards and Docks, Dept. Navy, Washington, D.C.

NAVFAC, D.M.-7 (1971), Soil Mechanics, Foundation and Earth Structures Design Manual, U.S. Departament of the Naval Facilities Command, Washington, D.C.

NETER, J., WASSERMAN, W. e WHITMORE, G.A. (1982), Applied Statistics, Allyn and Bacon, inc., 2ª edição, Boston, EUA.

OLSON, R.E. (1977), «Consolidation under Time Dependent Loading», Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol.103, nº GT1, janeiro.

ORTIGAO, J.A.R. (1980), Aterro Experimental Levado à Ruptura sobre a Argila Cinza do Rio de Janeiro, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ.

ORTIGAO, J.A.R., COLLET, H.B. (1986), «A Eliminação de Erros de Atrito em Ensaios de Palheta», Solos e Rochas, vol. 9, nº 2, p.p. 33-45.

PACHECO, M.P. (1990), «Conceitos de Probabilidade e Análise de Risco em Estudos e Projetos de Geotecnia», Conferência especial sobre métodos probabilísticos em Geotecnia, IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Salvador, BA.

POULOS, H.G. e DAVIS, E.H. (1974), Elastic Solution for Soil and Rock Mechanics, John Wiley & Sons, inc.

RICHART Jr., F.E. (1959), «Review of the Theories for Sand Drains», Transactions, ASCE, vol.124, p.p.709-736.

SANTA MARIA, P.E.L. de (1977), Ensaio de Adensamento com Drenagem Radial Interna e Externa - Solução Teórica, Tese M.Sc., COPPE/UFRJ.

SCHMERTMANN, S.H. (1955), «The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay», Transactions, ASCE, paper nº2775.

SCOTT, R. F. (1961), «New Method of Consolidation Coefficient Evaluation», Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol.87, nº SM1, p.p.29-39.

SEYMOUR-JONES, A.A. (1978), «Settlement Rate Experience for the Use of Sand Drains in a Tidal Marsh Deposit», Transportation Research Record, Washington, nº 678, p.p.41-42.

SILLS, G.C., ALMEIDA, M.S.S. e DANZIGER, F.A.B. (1988), «Coefficient of Consolidation from Piezocone Dissipation Tests in a Very Soft Clay», International Symposium on Penetration Test, Orlando, março.

SINGH, G. e HATTAB, T.N. (1979), «A Laboratory Study of Efficiency of Sand Drains in Relation to Methods of Installation and Spacing», Géotechnique, vol.29, nº4, p.p.395-422.

SMITH, G.N. (1986), Probability and Statistics in Civil Engineering: an Introduction, Collins, London.



SPIEGEL, M.R. (1984), Estatística, McGraw-Hill do Brasil, 2ª edição, tradução por CRUSIUS, C.A.

TAN, S.B. (1971), «Empirical Method for Estimating Secondary and Total Settlement», Proceedings of 4<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, vol.2, p.p.147-151.

TANG, W.H. (1984), «Principles of Probabilistic Characterization of Soil properties», Probabilistic Characterization of Soil Properties, David S. Bowles & Hon-Yim Ko ed., p.p.74-89.

TAYLOR, D.W. (1948), Soil Mechanics, Wiley International Edition, New York, John Wiley & Sons, Inc., London.

TERRA, B.R.C.S.S.R. (1988), Análise de Recalques do Aterro Experimental II sobre a Argila Mole de Sarapuí com Elementos Drenantes, Tese M.Sc., COPPE/UFRJ.

TERZAGHI, K. (1923), «Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungserscheinungen», Akademie der Wissenschaften in Wien, Abt. IIa, vol. 132, n<sup>o</sup> 3/4, p.p. 125-138, citado por TERZAGHI (1943).

TERZAGHI, K., FROLICH, O.K. (1936), Theorie der Setzung von Tonschichten, Vienna, F. Deuticke, citado por TERZAGHI (1943).

TERZAGHI, K. (1943), Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.

VANMARCKE, E.H. (1977), «Probabilistic Modeling of Soil Profiles», Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol.103, nº GT11, p.p.1227-1246.

VELLOSO, D.A. (1988), Notas de aula do curso Matemática para Engenheiros Geotécnicos II, COPPE/UFRJ.

VIEIRA, L.O.M. (1988), Contribuição ao Estudo do Adensamento Secundário, Tese M.Sc., COPPE/UFRJ.

WINTERKORN, H.F. e FANG, H. (1975), Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinbold Company.